

SECCIÓN 6 (SI) - ESTRUCTURAS DE ACERO

CONTENIDO

| | | |
|-----------|---|------|
| 6.1 | CAMPO DE APLICACIÓN | 6-1 |
| 6.2 | DEFINICIONES | 6-1 |
| 6.3 | SIMBOLOGÍA | 6-11 |
| 6.4 | MATERIALES | 6-25 |
| 6.4.1 | Aceros estructurales | 6-25 |
| 6.4.2 | Pasadores, rodillos y balancines | 6-28 |
| 6.4.3 | Bulones, tuercas y arandelas | 6-28 |
| 6.4.3.1 | Bulones | 6-28 |
| 6.4.3.2 | Tuercas | 6-29 |
| 6.4.3.3 | Arandelas | 6-29 |
| 6.4.3.4 | Sujetadores alternativos | 6-29 |
| 6.4.3.5 | Dispositivos indicadores de la carga | 6-30 |
| 6.4.4 | Conectores de corte tipo perno | 6-30 |
| 6.4.5 | Metal de soldadura | 6-30 |
| 6.4.6 | Metal fundido | 6-30 |
| 6.4.6.1 | Fundiciones de acero y hierro dúctil | 6-30 |
| 6.4.6.2 | Fundiciones maleables | 6-31 |
| 6.4.6.3 | Hierro fundido | 6-31 |
| 6.4.7 | Acero inoxidable | 6-31 |
| 6.4.8 | Cables | 6-32 |
| 6.4.8.1 | Alambre brillante | 6-32 |
| 6.4.8.2 | Alambre galvanizado | 6-32 |
| 6.4.8.3 | Alambre con recubrimiento epoxi | 6-32 |
| 6.4.8.4 | Cables para puentes | 6-32 |
| 6.5 | ESTADOS LÍMITES | 6-32 |
| 6.5.1 | Disposiciones generales | 6-32 |
| 6.5.2 | Estado límite de servicio | 6-33 |
| 6.5.3 | Estado límite de fatiga y fractura | 6-33 |
| 6.5.4 | Estado límite de resistencia fractura | 6-33 |
| 6.5.4.1 | Disposiciones generales | 6-33 |
| 6.5.4.2 | Factores de resistencia | 6-33 |
| 6.5.5 | Estado límite correspondiente a evento extremo | 6-35 |
| 6.6 | CONSIDERACIONES SOBRE EL ESTADO LÍMITE DE FATIGA Y FRACTURA | 6-35 |
| 6.6.1 | Fatiga | 6-35 |
| 6.6.1.1 | Disposiciones generales | 6-35 |
| 6.6.1.2 | Fatiga inducida por las cargas | 6-35 |
| 6.6.1.2.1 | Aplicación | 6-35 |

| | | |
|-----------|--|------|
| 6.6.1.2.2 | Criterios de diseño | 6-36 |
| 6.6.1.2.3 | Categorías para diseño a fatiga | 6-37 |
| 6.6.1.2.4 | Detalles cuyo uso está prohibido | 6-49 |
| 6.6.1.2.5 | Resistencia a la fatiga | 6-49 |
| 6.6.1.3 | Fatiga inducida por distorsión | 6-52 |
| 6.6.1.3.1 | Placas de unión transversales | 6-52 |
| 6.6.1.3.2 | Placas de unión laterales | 6-53 |
| 6.6.1.3.3 | Tableros ortótropos | 6-53 |
| 6.6.2 | Fractura | 6-53 |
| 6.7 | REQUISITOS GENERALES DE DIMENSIONAMIENTO Y DETALLADO..... | 6-57 |
| 6.7.1 | Longitud de tramo efectiva | 6-57 |
| 6.7.2 | Contraflechas para compensar los efectos de las cargas permanentes | 6-57 |
| 6.7.3 | Mínimo espesor del acero | 6-57 |
| 6.7.4 | Diafragmas y marcos transversales | 6-57 |
| 6.7.4.1 | Disposiciones generales | 6-57 |
| 6.7.4.2 | Secciones doble Te rectas | 6-58 |
| 6.7.4.3 | Secciones tipo cajón rectas | 6-59 |
| 6.7.4.4 | Celosías y arcos | 6-61 |
| 6.7.5 | Arriostramiento lateral | 6-61 |
| 6.7.5.1 | Disposiciones generales | 6-61 |
| 6.7.5.2 | Secciones doble Te rectas | 6-62 |
| 6.7.5.3 | Secciones tipo omega invertida rectas | 6-62 |
| 6.7.5.4 | Celosías | 6-63 |
| 6.7.6 | Pasadores | 6-63 |
| 6.7.6.1 | Ubicación | 6-63 |
| 6.7.6.2 | Resistencia..... | 6-64 |
| 6.7.6.2.1 | Combinación de flexión y corte | 6-64 |
| 6.7.6.2.2 | Aplastamiento | 6-64 |
| 6.7.6.3 | Mínimo tamaño de pasador para las barras de ojo | 6-65 |
| 6.7.6.4 | Pasadores y tuercas para pasadores | 6-65 |
| 6.8 | ELEMENTOS TRACCIONADOS | 6-65 |
| 6.8.1 | Disposiciones generales | 6-65 |
| 6.8.2 | Resistencia a la tracción | 6-66 |
| 6.8.2.1 | Disposiciones generales | 6-66 |
| 6.8.2.2 | Factor de reducción, U | 6-67 |
| 6.8.2.3 | Combinación de tracción y flexión | 6-68 |
| 6.8.3 | Área neta | 6-69 |
| 6.8.4 | Relación de esbeltez límite | 6-69 |
| 6.8.5 | Elementos armados | 6-70 |
| 6.8.5.1 | Disposiciones generales | 6-70 |
| 6.8.5.2 | Placas perforadas | 6-70 |

| | | |
|-------------|--|------|
| 6.8.6 | Barras de ojo | 6-70 |
| 6.8.6.1 | Resistencia mayorada | 6-70 |
| 6.8.6.2 | Dimensiones | 6-71 |
| 6.8.6.3 | Paquetes de barras de ojo | 6-71 |
| 6.8.7 | Placas conectadas mediante pasadores | 6-71 |
| 6.8.7.1 | Disposiciones generales | 6-71 |
| 6.8.7.2 | Placas para pasadores | 6-72 |
| 6.8.7.3 | Dimensiones | 6-72 |
| 6.8.7.4 | Paquetes | 6-73 |
| 6.9 | ELEMENTOS COMPRIMIDOS | 6-73 |
| 6.9.1 | Disposiciones generales | 6-73 |
| 6.9.2 | Resistencia a la compresión | 6-73 |
| 6.9.2.1 | Compresión axial | 6-73 |
| 6.9.2.2 | Combinación de compresión axial y flexión | 6-73 |
| 6.9.3 | Relación de esbeltez límite | 6-74 |
| 6.9.4 | Elementos no compuestos | 6-75 |
| 6.9.4.1 | Resistencia nominal a la compresión | 6-75 |
| 6.9.4.2 | Coeficientes de pandeo de placas y ancho de placas para compresión axial | 6-76 |
| 6.9.4.3 | Elementos armados | 6-78 |
| 6.9.4.3.1 | Disposiciones generales | 6-78 |
| 6.9.4.3.2 | Placas perforadas | 6-78 |
| 6.9.5 | Elementos compuestos | 6-78 |
| 6.9.5.1 | Resistencia nominal a la compresión | 6-78 |
| 6.9.5.2 | Limitaciones | 6-80 |
| 6.9.5.2.1 | Disposiciones generales | 6-80 |
| 6.9.5.2.2 | Tubos rellenos de hormigón | 6-80 |
| 6.9.5.2.3 | Perfiles revestidos de hormigón | 6-80 |
| 6.10 | ELEMENTOS DE SECCIÓN DOBLE TE SOLICITADOS A FLEXIÓN | 6-81 |
| 6.10.1 | Disposiciones generales | 6-81 |
| 6.10.1.1 | Secciones compuestas | 6-82 |
| 6.10.1.1.1 | Tensiones | 6-82 |
| 6.10.1.1.1a | Secuencia de carga | 6-82 |
| 6.10.1.1.1b | Tensiones para secciones en flexión positiva | 6-83 |
| 6.10.1.1.1c | Tensiones para secciones en flexión negativa | 6-83 |
| 6.10.1.1.1d | Tensiones en el tablero de hormigón | 6-84 |
| 6.10.1.1.1e | Ancho efectivo del tablero de hormigón | 6-84 |
| 6.10.1.2 | Secciones no compuestas | 6-84 |
| 6.10.1.3 | Secciones híbridas | 6-84 |
| 6.10.1.4 | Secciones de profundidad de alma variable | 6-85 |
| 6.10.1.5 | Rigidez | 6-86 |
| 6.10.1.6 | Tensiones en las alas y momentos flectores en los elementos | 6-87 |

| | |
|--|-------|
| 6.10.1.7 Mínima armadura para flexión negativa en el tablero de hormigón | 6-89 |
| 6.10.1.8 Fractura de la sección neta | 6-91 |
| 6.10.1.9 Resistencia al pandeo flexional del alma | 6-91 |
| 6.10.1.9.1 Almas sin rigidizadores longitudinales | 6-91 |
| 6.10.1.9.2 Almas con rigidizadores longitudinales | 6-94 |
| 6.10.1.10 Factores de reducción de la resistencia de las alas | 6-95 |
| 6.10.1.10.1 Factor de hibridez, R_h | 6-95 |
| 6.10.1.10.2 Factor de balanceo de las cargas, R_b | 6-96 |
| 6.10.2 Límites aplicables a las dimensiones de la sección transversal | 6-100 |
| 6.10.2.1 Proporciones del alma | 6-100 |
| 6.10.2.1.1 Almas sin rigidizadores longitudinales | 6-100 |
| 6.10.2.1.2 Almas con rigidizadores longitudinales | 6-101 |
| 6.10.2.2 Proporciones de las alas | 6-102 |
| 6.10.3 Construibilidad | 6-103 |
| 6.10.3.1 Disposiciones generales | 6-103 |
| 6.10.3.2 Flexión | 6-104 |
| 6.10.3.2.1 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a compresión | 6-104 |
| 6.10.3.2.2 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a tracción | 6-106 |
| 6.10.3.2.3 Alas con apoyo lateral continuo solicitadas a tracción o compresión | 6-106 |
| 6.10.3.2.4 Tablero de hormigón | 6-107 |
| 6.10.3.3 Corte | 6-107 |
| 6.10.3.4 Colocación del tablero | 6-108 |
| 6.10.3.5 Deflexiones por cargas permanentes | 6-110 |
| 6.10.4 Estado Límite de Servicio | 6-110 |
| 6.10.4.1 Deformaciones elásticas | 6-111 |
| 6.10.4.2 Deformaciones permanentes | 6-111 |
| 6.10.4.2.1 Disposiciones generales | 6-111 |
| 6.10.4.2.2 Flexión | 6-111 |
| 6.10.5 Estado Límite de Fatiga y Fractura | 6-113 |
| 6.10.5.1 Fatiga | 6-113 |
| 6.10.5.2 Fractura | 6-114 |
| 6.10.5.3 Requisito especial sobre fatiga aplicable a las almas | 6-114 |
| 6.10.6 Estado Límite de Resistencia | 6-115 |
| 6.10.6.1 Disposiciones generales | 6-115 |
| 6.10.6.2 Flexión | 6-115 |
| 6.10.6.2.1 Disposiciones generales | 6-115 |
| 6.10.6.2.2 Secciones compuestas en flexión positiva | 6-117 |
| 6.10.6.2.3 Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas | 6-118 |
| 6.10.6.3 Corte | 6-120 |
| 6.10.6.4 Conectores de corte | 6-120 |
| 6.10.7 Resistencia a la flexión – Secciones compuestas en flexión positiva | 6-120 |

| | |
|--|-------|
| 6.10.7.1 Secciones compactas | 6-121 |
| 6.10.7.1.1 Disposiciones generales | 6-121 |
| 6.10.7.1.2 Resistencia nominal a la flexión | 6-121 |
| 6.10.7.2 Secciones no compactas | 6-124 |
| 6.10.7.2.1 Disposiciones generales | 6-124 |
| 6.10.7.2.2 Resistencia nominal a la flexión | 6-125 |
| 6.10.7.3 Requisito de ductilidad | 6-125 |
| 6.10.8 Resistencia a la flexión – Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas | 6-126 |
| 6.10.8.1 Disposiciones generales | 6-126 |
| 6.10.8.1.1 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a compresión | 6-126 |
| 6.10.8.1.2 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a tracción | 6-126 |
| 6.10.8.1.3 Alas con apoyo lateral continuo solicitadas a tracción o compresión | 6-127 |
| 6.10.8.2 Resistencia a la flexión del ala de compresión | 6-127 |
| 6.10.8.2.1 Disposiciones generales | 6-127 |
| 6.10.8.2.2 Resistencia al pandeo local | 6-128 |
| 6.10.8.2.3 Resistencia al pandeo lateral torsional | 6-129 |
| 6.10.8.3 Resistencia a la flexión del ala de tracción | 6-137 |
| 6.10.9 Resistencia al corte | 6-137 |
| 6.10.9.1 Disposiciones generales | 6-137 |
| 6.10.9.2 Resistencia nominal de las almas no rigidizadas | 6-139 |
| 6.10.9.3 Resistencia nominal de las almas rigidizadas | 6-139 |
| 6.10.9.3.1 Disposiciones generales | 6-139 |
| 6.10.9.3.2 Paneles interiores | 6-139 |
| 6.10.9.3.3 Paneles extremos | 6-141 |
| 6.10.10 Conectores de corte | 6-141 |
| 6.10.10.1 Disposiciones generales | 6-142 |
| 6.10.10.1.1 Tipos | 6-142 |
| 6.10.10.1.2 Separación de los conectores de corte en la dirección de la carga | 6-142 |
| 6.10.10.1.3 Separación transversal | 6-143 |
| 6.10.10.1.4 Recubrimiento de hormigón y penetración | 6-143 |
| 6.10.10.2 Resistencia al a fatiga | 6-144 |
| 6.10.10.3 Requisitos especiales para puntos de contraflexión bajo carga permanente | 6-144 |
| 6.10.10.4 Estado Límite de Resistencia | 6-145 |
| 6.10.10.4.1 Disposiciones generales | 6-145 |
| 6.10.10.4.2 Fuerza de corte nominal | 6-145 |
| 6.10.10.4.3 Resistencia nominal al corte | 6-147 |
| 6.10.11 Rigidizadores | 6-147 |
| 6.10.11.1 Rigidizadores transversales intermedios | 6-147 |
| 6.10.11.1.1 Disposiciones generales | 6-147 |
| 6.10.11.1.2 Ancho saliente | 6-148 |
| 6.10.11.1.3 Momento de inercia | 6-148 |

| | |
|--|-------|
| 6.10.11.1.4 Área | 6-149 |
| 6.10.11.2 Rigidizadores de apoyo | 6-150 |
| 6.10.11.2.1 Disposiciones generales | 6-150 |
| 6.10.11.2.2 Ancho saliente | 6-151 |
| 6.10.11.2.3 Resistencia al aplastamiento | 6-151 |
| 6.10.11.2.4 Resistencia axial de los rigidizadores de apoyo | 6-151 |
| 6.10.11.2.4a Disposiciones generales | 6-151 |
| 6.10.11.2.4b Sección efectiva | 6-152 |
| 6.10.11.3 Rigidizadores longitudinales | 6-152 |
| 6.10.11.3.1 Disposiciones generales | 6-152 |
| 6.10.11.3.2 Ancho saliente | 6-155 |
| 6.10.11.3.3 Momento de inercia y radio de giro | 6-155 |
| 6.10.12 Cubrejuntas | 6-156 |
| 6.10.12.1 Disposiciones generales | 6-156 |
| 6.10.12.2 Requisitos aplicables a los extremos de los cubrejuntas | 6-156 |
| 6.10.12.2.1 Disposiciones generales | 6-157 |
| 6.10.12.2.2 Extremos soldados | 6-157 |
| 6.10.12.2.3 Extremos abulonados | 6-157 |
| 6.11 ELEMENTOS DE SECCIÓN TIPO CAJÓN SOLICITADOS A FLEXIÓN | 6-159 |
| 6.11.1 Disposiciones generales | 6-159 |
| 6.11.1.1 Determinación de las tensiones | 6-161 |
| 6.11.1.2 Apoyos | 6-164 |
| 6.11.1.3 Uniones entre ala y alma | 6-165 |
| 6.11.1.4 Bocas de acceso y drenaje | 6-165 |
| 6.11.2 Límites aplicables a las dimensiones de la sección transversal | 6-166 |
| 6.11.2.1 Dimensiones del alma | 6-166 |
| 6.11.2.1.1 Disposiciones generales | 6-166 |
| 6.11.2.1.2 Almas sin rigidizadores longitudinales | 6-166 |
| 6.11.2.1.3 Almas con rigidizadores longitudinales | 6-166 |
| 6.11.2.2 Dimensiones de las alas | 6-166 |
| 6.11.2.3 Restricciones especiales aplicables al uso del factor de distribución de las sobrecargas vivas en el caso de las secciones tipo cajón múltiple | 6-167 |
| 6.11.3 Construibilidad | 6-168 |
| 6.11.3.1 Disposiciones generales | 6-168 |
| 6.11.3.2 Flexión | 6-168 |
| 6.11.3.3 Corte | 6-171 |
| 6.11.4 Estado Límite de Servicio | 6-172 |
| 6.11.5 Estado Límite de Fatiga y Fractura | 6-173 |
| 6.11.6 Estado Límite de Resistencia | 6-174 |
| 6.11.6.1 Disposiciones generales | 6-174 |
| 6.11.6.2 Flexión | 6-175 |

| | |
|--|-------|
| 6.11.6.2.1 Disposiciones generales | 6-175 |
| 6.11.6.2.2 2 Secciones en flexión positiva | 6-175 |
| 6.11.6.2.3 Secciones en flexión negativa | 6-176 |
| 6.11.6.3 Corte | 6-176 |
| 6.11.6.4 Conectores de corte | 6-176 |
| 6.11.7 Resistencia a la flexión – Secciones en flexión positiva | 6-176 |
| 6.11.7.1 Secciones compactas | 6-177 |
| 6.11.7.1.1 Disposiciones generales | 6-177 |
| 6.11.7.1.2 Resistencia nominal a la flexión | 6-177 |
| 6.11.7.2 Secciones no compactas | 6-177 |
| 6.11.7.2.1 Disposiciones generales | 6-177 |
| 6.11.7.2.2 Resistencia nominal a la flexión | 6-178 |
| 6.11.8 Resistencia a la flexión – Secciones en flexión negativa | 6-179 |
| 6.11.8.1 Disposiciones generales | 6-179 |
| 6.11.8.1.1 Alas de secciones tipo cajón solicitadas a compresión | 6-179 |
| 6.11.8.1.2 Alas con apoyo lateral continuo solicitadas a tracción | 6-181 |
| 6.11.8.2 Resistencia a la flexión de las alas de las secciones tipo cajón solicitadas a compresión | 6-181 |
| 6.11.8.2.1 Disposiciones generales | 6-181 |
| 6.11.8.2.2 Alas no rigidizadas | 6-181 |
| 6.11.8.2.3 Alas rigidizadas longitudinalmente | 6-183 |
| 6.11.8.3 Resistencia a la flexión del ala de tracción | 6-185 |
| 6.11.9 Resistencia al corte | 6-185 |
| 6.11.10 Conectores de corte | 6-186 |
| 6.11.11 Rigidizadores | 6-187 |
| 6.11.11.1 Rigidizadores de alma | 6-187 |
| 6.11.11.2 Rigidizadores longitudinales de las alas de compresión | 6-187 |
| 6.12 ELEMENTOS VARIOS SOLICITADOS A FLEXIÓN | 6-191 |
| 6.12.1 Disposiciones generales | 6-191 |
| 6.12.1.1 Alcance | 6-191 |
| 6.12.1.2 Estado Límite de Resistencia | 6-191 |
| 6.12.1.2.1 Flexión | 6-191 |
| 6.12.1.2.2 Combinación de flexión y carga axial | 6-192 |
| 6.12.1.2.3 Corte | 6-192 |
| 6.12.2 Resistencia nominal a la flexión | 6-192 |
| 6.12.2.1 Disposiciones generales | 6-192 |
| 6.12.2.2 Elementos no compuestos | 6-192 |
| 6.12.2.2.1 Elementos de sección en forma de doble Te y H | 6-192 |
| 6.12.2.2.2 Elementos de sección tipo cajón | 6-193 |
| 6.12.2.2.2 Tubos de sección circular | 6-194 |
| 6.12.2.2.4 Perfiles U, perfiles L, perfiles Te y barras | 6-195 |
| 6.12.2.3 Elementos compuestos | 6-195 |

| | | |
|-------------|---|-------|
| 6.12.2.3.1 | Perfiles revestidos de hormigón | 6-195 |
| 6.12.2.3.2 | Tubos rellenos de hormigón | 6-196 |
| 6.12.3 | Resistencia nominal al corte de los elementos compuestos | 6-197 |
| 6.12.3.1 | Perfiles revestidos de hormigón | 6-197 |
| 6.12.3.2 | Tubos rellenos de hormigón | 6-197 |
| 6.12.3.2.1 | Tubos de sección rectangular | 6-197 |
| 6.12.3.2.2 | Tubos de sección circular | 6-197 |
| 6.13 | UNIONES Y EMPALMES | 6-198 |
| 6.13.1 | Disposiciones generales | 6-198 |
| 6.13.2 | Uniones abulonadas | 6-199 |
| 6.13.2.1 | Disposiciones generales | 6-199 |
| 6.13.2.1.1 | Uniones antideslizantes | 6-199 |
| 6.13.2.1.2 | Uniones por aplastamiento | 6-200 |
| 6.13.2.2 | Resistencia mayorada | 6-200 |
| 6.13.2.3 | Bulones, tuercas y arandelas | 6-202 |
| 6.13.2.3.1 | Bulones y tuercas | 6-202 |
| 6.13.2.3.2 | Arandelas | 6-202 |
| 6.13.2.4 | Orificios | 6-202 |
| 6.13.2.4.1 | Tipo | 6-202 |
| 6.13.2.4.1a | Disposiciones generales | 6-203 |
| 6.13.2.4.1b | Orificios holgados | 6-203 |
| 6.13.2.4.1c | Orificios ovalados cortos | 6-203 |
| 6.13.2.4.1d | Orificios ovalados largos | 6-203 |
| 6.13.2.4.2 | Tamaño | 6-203 |
| 6.13.2.5 | Tamaño de los bulones | 6-204 |
| 6.13.2.6 | Separación de los bulones | 6-204 |
| 6.13.2.6.1 | Mínima separación y distancia libre | 6-204 |
| 6.13.2.6.2 | Máxima separación de los bulones que se utilizan para sellar una junta | 6-204 |
| 6.13.2.6.3 | Máxima separación de los bulones de hilván | 6-205 |
| 6.13.2.6.4 | Máxima separación de los bulones de hilván en el extremo de los elementos comprimidos | 6-205 |
| 6.13.2.6.5 | Distancia a los extremos | 6-206 |
| 6.13.2.6.6 | Distancias a los bordes | 6-206 |
| 6.13.2.7 | Resistencia al corte | 6-206 |
| 6.13.2.8 | Resistencia al deslizamiento | 6-208 |
| 6.13.2.9 | Resistencia al aplastamiento en los orificios para bulones | 6-211 |
| 6.13.2.10 | Resistencia a la tracción | 6-212 |
| 6.13.2.10.1 | Disposiciones generales | 6-212 |
| 6.13.2.10.2 | Resistencia nominal a la tracción | 6-213 |
| 6.13.2.10.3 | Resistencia a la fatiga | 6-213 |
| 6.13.2.10.4 | Acción de palanca | 6-213 |

| | |
|---|-------|
| 6.13.2.11 Combinación de tracción y corte | 6-214 |
| 6.13.3 Uniones soldadas | 6-215 |
| 6.13.3.1 Disposiciones generales | 6-215 |
| 6.13.3.2 Resistencia mayorada | 6-215 |
| 6.13.3.2.1 Disposiciones generales | 6-215 |
| 6.13.3.2.2 Uniones mediante soldaduras de ranura de penetración total | 6-215 |
| 6.13.3.2.2a Tracción y compresión | 6-215 |
| 6.13.3.2.2b Corte | 6-216 |
| 6.13.3.2.3 Uniones mediante soldaduras de ranura de penetración parcial | 6-216 |
| 6.13.3.2.3a Tracción o compresión | 6-216 |
| 6.13.3.2.3b Corte | 6-216 |
| 6.13.3.2.4 Uniones mediante soldaduras de filete | 6-217 |
| 6.13.3.2.4a Tracción y compresión | 6-217 |
| 6.13.3.2.4b Corte | 6-217 |
| 6.13.3.3 Área efectiva | 6-217 |
| 6.13.3.4 Tamaño de las soldaduras de filete | 6-218 |
| 6.13.3.5 Mínima longitud efectiva de las soldaduras de filete | 6-218 |
| 6.13.3.6 Retorno de los extremos de las soldaduras de filete | 6-218 |
| 6.13.3.7 Soldaduras de sellado | 6-219 |
| 6.13.4 Resistencia a la rotura de bloque de corte | 6-219 |
| 6.13.5 Elementos de conexión | 6-220 |
| 6.13.5.1 Disposiciones generales | 6-220 |
| 6.13.5.2 Tracción | 6-220 |
| 6.13.5.3 Corte | 6-221 |
| 6.13.6 Empalmes | 6-221 |
| 6.13.6.1 Empalmes abulonados | 6-221 |
| 6.13.6.1.1 Disposiciones generales | 6-221 |
| 6.13.6.1.2 Elementos traccionados | 6-221 |
| 6.13.6.1.3 Elementos comprimidos | 6-221 |
| 6.13.6.1.4 Elementos solicitados a flexión | 6-222 |
| 6.13.6.1.4a Disposiciones generales | 6-222 |
| 6.13.6.1.4b Empalmes en las almas | 6-223 |
| 6.13.6.1.4c Empalmes en las alas | 6-228 |
| 6.13.6.1.5 Separadores | 6-232 |
| 6.13.6.2 Empalmes soldados | 6-233 |
| 6.13.7 Conexiones de los pórticos rígidos | 6-234 |
| 6.13.7.1 Disposiciones generales | 6-234 |
| 6.13.7.2 Almas | 6-234 |
| 6.14 REQUISITOS PARA DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS | 6-235 |
| 6.14.1 Puentes de vigas con tablero inferior | 6-235 |
| 6.14.2 Celosías | 6-236 |

| | |
|--|-------|
| 6.14.2.1 Disposiciones generales | 6-236 |
| 6.14.2.2 Elementos de las celosías | 6-236 |
| 6.14.2.3 Tensiones secundarias | 6-236 |
| 6.14.2.4 Diafragmas | 6-237 |
| 6.14.2.5 Contraflecha | 6-237 |
| 6.14.2.6 Líneas de trabajo y ejes de gravedad | 6-237 |
| 6.14.2.7 Arriostramiento transversal y contravientos | 6-237 |
| 6.14.2.7.1 Disposiciones generales | 6-237 |
| 6.14.2.7.2 Puentes de celosía con tablero inferior | 6-238 |
| 6.14.2.7.3 Puentes de celosía con tablero superior | 6-238 |
| 6.14.2.8 Placas de empalme | 6-238 |
| 6.14.2.9 Puentes de armadura rebajada | 6-239 |
| 6.14.2.10 Resistencia mayorada | 6-239 |
| 6.14.3 Superestructuras con tableros ortótropos | 6-239 |
| 6.14.3.1 Disposiciones generales | 6-240 |
| 6.14.3.2 Ancho efectivo del tablero | 6-240 |
| 6.14.3.3 Superposición de efectos globales y locales | 6-240 |
| 6.14.3.3.1 Disposiciones generales | 6-240 |
| 6.14.3.3.2 Tableros en tracción global | 6-240 |
| 6.14.3.3.3 Tableros en compresión global | 6-241 |
| 6.14.3.4 Flexión transversal | 6-241 |
| 6.14.3.5 Diafragmas | 6-242 |
| 6.14.4 Arcos de alma maciza | 6-242 |
| 6.14.4.1 Amplificación de momentos para considerar las flechas | 6-242 |
| 6.14.4.2 Esbeltez de las almas | 6-242 |
| 6.14.4.2 Estabilidad de las alas | 6-243 |
| 6.15 PILOTES | 6-243 |
| 6.15.1 Disposiciones generales | 6-243 |
| 6.15.2 Resistencia estructural | 6-243 |
| 6.15.3 Resistencia a la compresión | 6-245 |
| 6.15.3.1 Resistencia a la compresión axial | 6-245 |
| 6.15.3.2 Combinación de compresión axial y flexión | 6-245 |
| 6.15.3.3 Pandeo | 6-245 |
| 6.15.4 Máximas tensiones de hincado admisibles | 6-246 |
| A6.1 DISPOSICIONES GENERALES | 6-247 |
| A6.1.1 Secciones con alas de compresión con arriostramiento discreto | 6-248 |
| A6.1.2 Secciones con alas de tracción con arriostramiento discreto | 6-250 |
| A6.1.3 Secciones con alas de compresión con apoyo lateral continuo | 6-250 |
| A6.1.4 Secciones con alas de tracción con apoyo lateral continuo | 6-250 |
| A6.2 FACTORES DE PLASTIFICACIÓN DEL ALMA | 6-251 |
| A6.2.1 Secciones de alma compacta | 6-251 |

| | |
|--|-------|
| A6.2.2 Secciones de alma no compacta | 6-252 |
| A6.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BASADA EN EL ALA DE COMPRESIÓN | 6-254 |
| A6.3.1 Disposiciones generales | 6-254 |
| A6.3.2 Resistencia al pandeo local | 6-255 |
| A6.3.3 Resistencia al pandeo lateral torsional | 6-256 |
| A6.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BASADA EN LA FLUENCIA DEL ALA DE TRACCIÓN | 6-259 |
| B6.1 DISPOSICIONES GENERALES | 6-261 |
| B6.2 CAMPO DE APLICACIÓN | 6-261 |
| B6.2.1 Dimensiones del alma | 6-262 |
| B6.2.2 Dimensiones del ala de compresión | 6-263 |
| B6.2.3 Transiciones entre diferentes secciones | 6-263 |
| B6.2.4 Arriostramiento lateral | 6-263 |
| B6.2.5 Corte | 6-264 |
| B6.2.6 Rigidizadores de apoyo | 6-264 |
| B6.3 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO | 6-264 |
| B6.3.1 Disposiciones generales | 6-264 |
| B6.3.2 Flexión | 6-264 |
| B6.3.2.1 Adyacente a secciones sobre pilas interiores | 6-264 |
| B6.3.2.2 En todas las demás ubicaciones | 6-265 |
| B6.3.3 Momentos de redistribución | 6-265 |
| B6.3.3.1 En secciones sobre pilas interiores | 6-265 |
| B6.3.3.2 En todas las demás ubicaciones | 6-266 |
| B6.4 ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA | 6-267 |
| B6.4.1 Resistencia a la flexión | 6-267 |
| B6.4.1.1 Adyacente a secciones sobre pilas interiores | 6-267 |
| B6.4.1.2 En todas las demás ubicaciones | 6-267 |
| B6.4.2 Momentos de redistribución | 6-267 |
| B6.4.2.1 En secciones sobre pilas interiores..... | 6-267 |
| B6.4.2.2 En todas las demás secciones | 6-268 |
| B6.5 MOMENTO PLÁSTICO EFECTIVO | 6-268 |
| B6.5.1 Secciones sobre pilas interiores con características momento-rotación mejoradas | 6-268 |
| B6.5.2 Todas las demás secciones sobre pilas interiores | 6-269 |
| B6.6 MÉTODO REFINADO | 6-270 |
| B6.6.1 Disposiciones generales | 6-270 |
| B6.6.2 Curvas momento nominal-rotación | 6-271 |
| C6.1 DISPOSICIONES GENERALES | 6-274 |
| C6.2 CONSIDERACIONES GENERALES | 6-274 |
| C6.3 DISEÑO DE LA SUPERESTRUCTURA | 6-274 |
| C6.4 DIAGRAMAS DE FLUJO PARA EL DISEÑO A FLEXIÓN DE SECCIONES DOBLE TE | 6-279 |
| C6.4.1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.3 | 6-279 |
| C6.4.2 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.4 | 6-280 |

| | |
|--|-------|
| C6.4.3 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.5 | 6-280 |
| C6.4.4 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.6 | 6-281 |
| C6.4.5 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.7 | 6-282 |
| C6.4.6 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.8 | 6-283 |
| C6.4.7 Diagrama de flujo para el Apéndice A | 6-285 |
| C6.4.8 Diagrama de flujo para el Artículo D6.4.1 | 6-287 |
| C6.4.9 Diagrama de flujo para el Artículo D6.4.2 | 6-288 |
| D6.1 MOMENTO PLÁSTICO | 6-289 |
| D6.2 MOMENTO DE FLUENCIA | 6-291 |
| D6.2.1 Secciones no compuestas | 6-291 |
| D6.2.2 Secciones compuestas en flexión positiva | 6-292 |
| D6.2.3 Secciones compuestas en flexión negativa | 6-293 |
| D6.2.4 Secciones con cubrejuntas | 6-293 |
| D6.3 PROFUNDIDAD COMPRIMIDA DEL ALMA | 6-293 |
| D6.3.1 En el rango elástico (D_c) | 6-293 |
| D6.3.2 Cuando se produce el momento plástico (D_{cp})..... | 6-294 |
| D6.4 ECUACIONES DE PANDEO LATERAL TORSIONAL PARA $C_B > 1.0$, CON ÉNFASIS EN LOS REQUISITOS SOBRE LONGITUD NO ARRIOSTRADA PARA DESARROLLO DE LA MÁXIMA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN | 6-296 |
| D6.4.1 Según los requisitos del Artículo 6.10.8.2.3 | 6-296 |
| D6.4.2 Según los requisitos del Artículo A6.3.3 | 6-297 |
| D6.5 CARGAS CONCENTRADAS APLICADAS A ALMAS SIN RIGIDIZADORES DE APOYO | 6-298 |
| D6.5.1 Disposiciones generales | 6-298 |
| D6.5.2 Fluencia local de las almas | 6-298 |
| D6.5.3 Abolladura del alma | 6-299 |

SECCIÓN 6 (SI)

ESTRUCTURAS DE ACERO

6.1 CAMPO DE APLICACIÓN

Esta sección abarca al diseño de elementos de acero, empalmes y uniones para estructuras de vigas, pórticos, celosías y arcos, sistemas atirantados y colgantes, y sistemas con tableros metálicos, según corresponda.

No se incluyen las estructuras tipo viga curva.

En el Apéndice C se presenta una breve guía para el diseño de puentes de vigas de acero.

La División I-A de las Especificaciones AASHTO contiene información limitada sobre el comportamiento sísmico de las estructuras de acero que se puede utilizar cuando resulte aplicable.

C61

La mayor parte de los requisitos referentes al dimensionamiento de los componentes principales están agrupados por acción estructural:

- Tracción y combinación de tracción y flexión (Artículo 6.8)
- Compresión y combinación de compresión y flexión (Artículo 6.9)
- Flexión y corte flexional:
 - Secciones doble Te (Artículo 6.10)
 - Secciones tipo cajón (Artículo 6.11)
 - Secciones varias (Artículo 6.12)

El Artículo 6.13 contiene requisitos para uniones y empalmes.

El Artículo 6.14 contiene requisitos específicos que se aplican a formas de armado y tipologías estructurales particulares, por ejemplo, puentes de vigas con tablero inferior, celosías, sistemas con tableros ortótropos, y arcos.

6.2 DEFINICIONES

Estribo – Soporte en un extremo de la superestructura de un puente.

Relación de aspecto – Relación entre las longitudes de los lados de cualquier configuración rectangular.

Viga – Elemento estructural cuya función principal es resistir cargas de flexión y corte.

Viga-columna – Elemento estructural cuya función principal es resistir tanto cargas axiales como momentos flectores.

Resistencia al pandeo flexional – Máxima carga que puede soportar una placa de alma sin experimentar pandeo local elástico teórico debido a la flexión.

Flexión biaxial – Flexión simultánea de un elemento o componente respecto de dos ejes perpendiculares.

Bifurcación del equilibrio – Fenómeno según el cual un elemento o componente idealmente recto o plano solicitado a compresión puede asumir una posición deformada o mantener su forma original, o bien un elemento idealmente recto solicitado a flexión se puede deformar y rotar fuera del plano o bien permanecer en su posición deformada en el plano.

Análisis de bifurcación del equilibrio – Análisis que se utiliza para determinar la carga de pandeo o bifurcación del equilibrio.

Rotura de bloque de corte – Falla de una unión abulonada en el alma de una viga rebajada o de cualquier unión solicitada a tracción que involucra el arrancamiento de una parte de una placa a lo largo del perímetro que forman los bulones de conexión.

Conjunto de un bulón – Incluye el bulón, la(s) tuerca(s) y la(s) arandela(s).

Ala de una sección tipo cajón – Ala que está conectada a dos almas. El ala puede ser una placa plana no rigidizada, una placa rigidizada o una placa plana con hormigón armado unido a la placa mediante conectores de corte.

Elemento de arriostramiento / Riostra – Elemento cuya intención es arriostrar un elemento principal o una parte del mismo contra el desplazamiento lateral.

Carga de pandeo – Carga bajo la cual un elemento o componente idealmente recto solicitado a compresión asume una posición deformada.

Elemento armado – Elemento formado por componentes de acero estructural soldados, abulonados o remachados entre sí.

Energía requerida en ensayo de impacto Charpy – Mínima energía que debe ser absorbida en un ensayo Charpy sobre probeta con entalladura en V realizado a una temperatura especificada.

Ensayo de impacto Charpy sobre probeta con entalladura en V – Ensayo de impacto de acuerdo con la norma AASHTO T 243M (ASTM A 673M).

Distancia libre entre bulones – Distancia entre bordes de orificios de bulones adyacentes.

Distancia libre de los bulones al borde – Distancia entre el borde del orificio de un bulón y el extremo del elemento.

Sección tipo cajón cerrado – Elemento que trabaja a flexión cuya sección transversal está compuesta por dos almas verticales o inclinadas y que tiene al menos una célula completamente cerrada. Las secciones tipo cajón cerrado son efectivas para resistir la aplicación de torsión, ya que desarrollan flujo de corte en las almas y alas.

Carga de colapso – Carga que puede soportar un elemento estructural o estructura inmediatamente antes que se produzca la falla.

Ala compacta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, ala de compresión con arriostramiento discreto que tiene una esbeltez para o por debajo de la cual el ala puede soportar deformaciones suficientes tales que se alcanza la máxima resistencia potencial a la flexión antes que el pandeo local del ala tenga un efecto estadísticamente significativo sobre la respuesta, siempre que se satisfagan los requisitos sobre arriostramiento lateral necesarios para desarrollar la máxima resistencia potencial a la flexión.

Sección compacta – Sección compuesta en flexión positiva que satisface requisitos específicos en cuanto a calidad del acero, esbeltez del alma y ductilidad, y que además es capaz de desarrollar una resistencia nominal superior al momento en primera fluencia pero no mayor que el momento plástico.

Longitud no arriostrada compacta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, longitud no arriostrada límite de un ala de compresión con arriostramiento discreto para o por debajo de la cual se puede alcanzar la máxima resistencia potencial a la flexión antes que el pandeo lateral torsional tenga un efecto estadísticamente significativo sobre la respuesta, siempre que se satisfagan los requisitos sobre arriostramiento lateral necesarios para desarrollar la máxima resistencia potencial a la flexión.

Alma compacta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, alma con una esbeltez para o por debajo de la cual la sección puede alcanzar una resistencia máxima a la flexión igual al momento

plástico antes que el pandeo flexional del alma tenga un efecto estadísticamente significativo sobre la respuesta, siempre que se satisfagan los requisitos sobre calidad del acero, ductilidad, esbeltez de las alas y/o arriostramiento lateral necesarios.

Componente – Parte constitutiva de una estructura.

Viga compuesta – Viga de acero conectada a un tablero de manera que responden a las solicitaciones como si se tratara de un único elemento.

Columna compuesta – Elemento estructural que trabaja a compresión y que consiste ya sea en perfiles estructurales revestidos con hormigón o bien en un tubo de acero llenado con hormigón y diseñado para responder antes las solicitaciones como si se tratara de un único elemento.

Unión / Conexión – Soldaduras o conjunto de bulones que transmiten tensiones normales y/o de corte de un elemento a otro.

Umbral de fatiga para amplitud constante – Rango nominal de tensiones por debajo del cual un detalle determinado puede soportar un número infinito de repeticiones sin fallar por fatiga.

Ala con apoyo lateral continuo – Ala con revestimiento de hormigón o anclada mediante conectores de corte de manera tal que no es necesario considerar los efectos de la flexión lateral sobre dicha ala. También se supone que un ala con apoyo lateral continuo comprimida no está sujeta a pandeo local o lateral torsional.

Ala determinante – Ala superior o inferior de la menor de las secciones en un punto de empalme, cualquiera sea el ala que tiene la máxima la relación entre el valor de la tensión flexional elástica debida a las cargas mayoradas a la mitad de su espesor y el valor de la resistencia a la flexión mayorada.

Carga crítica – Carga bajo la cual se produce la bifurcación del equilibrio, determinada mediante un análisis teórico de la estabilidad.

Marco transversal – Reticulado transversal que conecta componentes longitudinales adyacentes que trabajan a flexión.

Distorsión de la sección transversal – Distorsión de la sección transversal de una sección tipo cajón cerrado o tipo omega invertida provocada por cargas de torsión.

Viga curva – Viga de sección doble Te, tipo cajón cerrado o tipo omega invertida que tiene curvatura en un plano horizontal.

Tablero – Elemento con o sin superficie de rodamiento que soporta las cargas de rueda en forma directa y es soportado por otros componentes.

Sistema de tablero – Superestructura en la cual el tablero está integrado con los componentes que lo soportan, o en la cual la deformación de los componentes que soportan el tablero tiene una influencia significativa sobre el comportamiento de dicho tablero

Puente de celosía con tablero superior – Sistema en el cual la calzada se encuentra al mismo nivel o a un nivel superior al del cordón superior de la celosía.

Categorías para diseño a fatiga – Agrupación de componentes y detalles que tienen esencialmente la misma resistencia a la fatiga.

Diafragma – Elemento transversal macizo, orientado verticalmente, que conecta componentes adyacentes longitudinales que trabajan a flexión o que se encuentran dentro de una sección tipo cajón cerrado o tipo omega invertida.

Ala con arriostramiento discreto – Ala con apoyos a intervalos discretos.

Fatiga inducida por distorsión – Efectos de fatiga debidos a tensiones secundarias que normalmente no se cuantifican en el análisis y diseño típico de un puente.

Distancia de los bulones al borde – Distancia perpendicular a la línea de fuerza entre el centro de un orificio y el borde del elemento.

Longitud efectiva – Longitud equivalente KL que se utiliza en las fórmulas para compresión y que se determina mediante un análisis de bifurcación del equilibrio.

Factor de longitud efectiva – Relación entre la longitud efectiva y la longitud no arriostrada del elemento medida entre los centros de gravedad de los elementos de arriostramiento.

Ancho efectivo – Ancho reducido de una placa o losa de hormigón que, suponiendo una distribución de tensiones uniforme, produce el mismo efecto sobre el comportamiento del elemento estructural que el ancho real de la placa con su distribución de tensiones no uniforme.

Comportamiento elástico – Respuesta estructural en la cual la tensión es directamente proporcional a la deformación y al retirar la carga no queda deformación remanente.

Análisis elástico – Determinación de las solicitaciones que actúan sobre los elementos y uniones en base a la hipótesis de que la respuesta tensión-deformación del material es lineal y que la deformación del material desaparece al cesar la fuerza que la produjo.

Material elastoplástico – Material ideal cuya curva tensión-deformación varía linealmente entre el punto de deformación nula y tensión nula hasta llegar al punto de fluencia del material, a partir de lo cual la deformación aumenta aunque no haya aumentos adicionales de la tensión.

Distancia de los bulones al extremo del elemento – Distancia entre el centro de un orificio y el extremo del elemento medida a lo largo de la línea de fuerza.

Panel del extremo / Panel final – Sección final de una viga o celosía.

Ingeniero – Ingeniero estructural matriculado responsable por el diseño del puente o por supervisar la construcción del puente.

Barra de ojo – Elemento de sección rectangular que trabaja a tracción y cuyos extremos están agrandados para permitir uniones articuladas.

Carga mayorada – Producto de la carga nominal por un factor de carga.

Sujetador – Término genérico que se utiliza para designar soldaduras, bulones, remaches u otros mecanismos de unión.

Fatiga – Iniciación y/o propagación de fisuras debido a una variación repetida de una tensión normal que tiene una componente de tracción.

Vida de diseño a fatiga – Número de años que se anticipa un detalle resistirá las cargas debidas al tráfico supuestas en el diseño sin sufrir fisuración por fatiga. Estas especificaciones suponen una vida de diseño a fatiga de 75 años.

Vida a fatiga – Número de ciclos de tensión que provoca que un detalle falle por fatiga.

Resistencia a la fatiga – Máximo rango de tensiones que puede soportar un detalle sin fallar para un número de ciclos especificado.

Vida a fatiga finita – Número de ciclos hasta la falla de un detalle cuando el máximo rango de tensiones probables es mayor que el umbral de fatiga para amplitud constante.

Análisis de primer orden – Análisis en el cual las condiciones de equilibrio se formulan en base a la estructura no deformada, es decir, las ecuaciones de equilibrio se escriben sin considerar el efecto de las deformaciones.

Flexión lateral de un ala – Flexión de un ala respecto de un eje perpendicular a la placa del ala debido a cargas laterales aplicadas al ala y/o torsión no uniforme en el elemento.

Fuerza / Solicitación – Resultante de la distribución de tensiones sobre un área determinada. Término genérico que se utiliza para designar cargas axiales, momentos flectores, pares torsores y cortes.

Elemento de fractura crítica (FCM, según sus siglas en inglés) – Componente traccionado cuya falla provocaría el colapso del puente o su incapacidad para satisfacer la función para la cual fue diseñado.

Tenacidad a la fractura – Medida de la capacidad que tiene un material o elemento para absorber energía sin fracturarse. Generalmente se determina mediante el ensayo de impacto Charpy sobre probeta con entalladura en V.

Separación de los bulones perpendicular a la dirección de la carga – Distancia entre líneas de bulones adyacentes ; distancia entre la parte posterior de un ángulo simple u otro perfil y la primera línea de bulones.

Longitud de apriete – Distancia entre la tuerca y la cabeza del bulón.

Placa nodal / Placa de empalme – Placa de material que se utiliza para conectar elementos verticales, diagonales y horizontales de un reticulado.

Puente de armadura rebajada – Sistema de celosía en el cual la calzada está ubicada entre el cordón superior y el cordón inferior. En estos sistemas los laterales se extienden por encima de la calzada pero no están conectados entre sí.

Viga híbrida – Viga de acero fabricada en la cual el alma tiene una resistencia a la fluencia mínima especificada menor que la de una o ambas alas.

Acción inelástica – Condición en la cual la deformación no se recupera completamente al retirar la carga que la produjo.

Redistribución inelástica – Redistribución de los esfuerzos internos en un componente o estructura provocada por deformaciones elásticas en una o más secciones.

Inestabilidad – Condición de carga sobre un componente o estructura a partir de la cual un aumento de la deformación provoca una disminución de la capacidad de carga.

Panel interior – Tramo interior de una viga o celosía.

Unión / Junta – Área donde se unen dos o más extremos, superficies o bordes. Las juntas se clasifican de acuerdo con el tipo de sujetador utilizado y el método de transferencia de cargas.

Enlazado – Placas o barras que se utilizan para conectar los componentes de un elemento.

Tensión de flexión lateral – Tensión normal provocada por la flexión lateral de un ala.

Elemento que provee arriostramiento lateral – Elemento que se utiliza individualmente o como parte de un sistema de arriostramiento lateral para evitar el pandeo de los componentes y/o para resistir cargas laterales.

Pandeo lateral torsional – Pandeo de un componente que involucra tanto deformación lateral como rotación.

Nivel – Parte de un pórtico rígido que incluye un elemento horizontal y todas las columnas entre dicho elemento y la base del pórtico o el elemento horizontal ubicado inmediatamente por debajo del elemento horizontal considerado.

Estado límite – Condición en la cual un componente o estructura deja de ser útil debido a que se considera que ya no resulta apto para la función para la cual fue diseñado o que es inseguro. Los límites que determinan la utilidad de una estructura incluyen las fallas frágiles, el colapso plástico, las deformaciones excesivas, la durabilidad, la fatiga, la inestabilidad y la serviciabilidad.

Solicitación – Momento, corte, fuerza axial o par torsor que las cargas aplicadas a la estructura provocan en un elemento.

Recorrido de una carga – Sucesión de elementos y uniones a través de la cual se transmite una carga desde su origen hasta su destino.

Fatiga inducida por las cargas – Efectos de fatiga debidos a las tensiones en el plano para las cuales explícitamente se diseñan los componentes y detalles.

Pandeo local – Pandeo de un elemento tipo placa solicitado a compresión.

Soldadura cargada longitudinalmente – Soldadura en la cual se aplica una tensión paralela al eje longitudinal de la misma.

Eje mayor – Eje baricéntrico respecto del cual el momento de inercia es un máximo; también se suele denominar eje principal mayor.

Tensión neta de tracción – Suma algebraica de dos o más tensiones cuyo resultado es de tracción.

Ala no compacta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, ala de compresión con arriostramiento discreto que tiene una esbeltez igual o por debajo del límite en el cual la fluencia localizada dentro de la sección transversal del elemento asociada con un alma híbrida, tensiones residuales y/o monosimetría de la sección transversal tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia nominal a la flexión.

Sección no compacta – Sección compuesta en flexión positiva para la cual no se permite que la resistencia nominal supere el momento en primera fluencia.

Longitud no arriostrada no compacta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, longitud no arriostrada límite de un ala de compresión con arriostramiento discreto igual o por debajo del límite en el cual la aparición de fluencia en cualquiera de las alas de la sección transversal con consideración de los efectos de las tensiones residuales en el ala de compresión tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia nominal a la flexión.

Alma no compacta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o una sección no compuesta, alma que satisface requisitos sobre calidad del acero y que tiene una esbeltez igual o por debajo del límite en el cual no ocurre pandeo flexional elástico teórico del alma para valores de tensión elástica, calculados de acuerdo con la teoría de vigas, menores que el límite de la resistencia nominal a la flexión.

Sección no compuesta – Viga de acero en la cual el tablero no está conectado a la sección de acero mediante conectores de corte.

Ala no determinante – En un punto de empalme, ala opuesta al ala determinante.

Torsión no uniforme – Torsión resistente interna en secciones de pared delgada, también conocida como torsión alabeada, que produce tensión de corte y tensiones normales, y bajo cuya acción las secciones transversales no permanecen planas. Los elementos que desarrollan torsión no uniforme resisten la torsión aplicada externamente mediante torsión alabeada y torsión de Saint-Venant. Ambas componentes de la torsión resistente interna varían a lo largo de la longitud del elemento, aunque la torsión concentrada aplicada externamente puede ser uniforme a lo largo del elemento entre dos puntos de restricción contra la torsión adyacentes. En los elementos de sección transversal abierta la torsión alabeada predomina sobre la torsión de Saint-Venant, mientras que en los elementos de sección transversal cerrada la torsión de Saint Venant predomina sobre la torsión alabeada.

Sección abierta – Elemento que trabaja a flexión cuya sección transversal no tiene ninguna célula completamente cerrada. Los elementos de sección abierta resisten torsión principalmente mediante torsión no uniforme, lo que provoca tensiones normales en las puntas de las alas.

Tablero ortótropo – Tablero formado por una placa de acero rigidizada con nervios de acero abiertos o cerrados soldados a la cara inferior de una placa de acero.

Deformación permanente – Tipo de acción inelástica en la cual el componente o sistema permanece deformado aun después de retirar la carga.

Pila – Columna, grupo de columnas conectadas entre sí u otra configuración diseñada como apoyo interior de la superestructura de un puente.

Separación de los bulones en la dirección de la carga – Distancia entre centros de orificios de bulones o conectores de corte a lo largo de la línea de fuerza.

Análisis plástico – Determinación de las solicitaciones sobre los elementos y conexiones en base a la hipótesis de comportamiento correspondiente a un sólido plástico, es decir, que el equilibrio se satisface en la totalidad de la estructura y que en ningún punto se excede la tensión de fluencia. Puede ser necesario considerar efectos de segundo orden.

Rótula plástica – Zona en fluencia que se forma en un elemento estructural cuando se llega al momento plástico. Se supone que la viga rota como si fuera articulada, excepto que dentro de la rótula se mantiene la capacidad de momento plástico.

Momento plástico – Momento resistente de una sección transversal completamente en fluencia.

Deformación plástica – Diferencia entre la deformación total y la deformación elástica.

Plastificación – Proceso de fluencia sucesiva de las fibras de la sección transversal de un elemento a medida que aumenta el momento flector.

Placa – Producto laminado plano cuyo espesor es mayor que 6.0 mm.

Resistencia postpandeo – Carga que puede soportar un elemento o componente después de sufrir pandeo.

Elemento principal – Elemento diseñado para soportar las fuerzas internas determinadas a partir de un análisis.

Acción de palanca – Acción de palanca que existe en las conexiones en las cuales la línea de aplicación de la carga es excéntrica respecto del eje del bulón, lo que provoca la deformación del accesorio y una amplificación de la carga axial sobre el bulón.

Momento de redistribución – Momento interno provocado por la fluencia en un elemento continuo solicitado a flexión y mantenido en equilibrio por medio de las reacciones externas.

Redistribución de momentos – Proceso que se da como resultado de la formación de deformaciones inelásticas en las estructuras continuas.

Tensión de redistribución – Tensión de flexión que produce el momento de redistribución.

Redundancia – Propiedad de un puente que le permite continuar satisfaciendo la función para la cual fue diseñado aun cuando éste haya sufrido daños.

Elemento redundante – Elemento cuya falla no provoca la falla del puente.

Vida a fatiga requerida – Producto entre el tráfico medio diario correspondiente a camiones en un único carril, el número de ciclos por pasada de camión, y la vida de diseño en días.

Tensión residual – Tensiones que permanecen en un elemento o componente no cargado luego de ser plegado en frío y/o de su enfriamiento posterior a un proceso de laminado o soldadura.

Flexión con curvatura doble – Condición de flexión en la cual los momentos que actúan en los extremos de un elemento hacen que el elemento adopte una forma de “S”.

Pórtico rígido – Estructura en la cual las conexiones conservan la relación angular entre vigas y columnas bajo carga.

Análisis de segundo orden – Análisis en el cual las condiciones de equilibrio se formulan en base a la estructura deformada, es decir, las ecuaciones de equilibrio se escriben considerando la posición deformada de la estructura.

Elemento secundario – Elemento en el cual la tensión normalmente no se evalúa durante el análisis.

Cargas de servicio – Cargas que se anticipa soportará la estructura bajo condiciones de uso normal.

Factor de forma – Relación entre el momento plástico y el momento de fluencia, o relación entre el módulo resistente plástico y el módulo resistente elástico de una sección.

Resistencia al pandeo por corte – Máxima carga que puede soportar una placa de alma sin experimentar pandeo teórico debido al corte.

Conector de corte – Dispositivo mecánico que impide movimientos relativos tanto normales como perpendiculares a una interfase.

Flujo de corte – Fuerza de corte por unidad de ancho que actúa paralela al borde de un elemento tipo placa.

Retraso del corte – Distribución no lineal de la tensión normal a través de un componente provocada por distorsiones debidas al corte.

Chapa – Producto laminado plano cuyo espesor está comprendido entre 0.15 y 6.0 mm.

Flexión con curvatura simple – Forma deformada de un elemento en la cual el centro de curvatura se encuentra del mismo lado del elemento en la totalidad de la longitud no arriostrada.

Ángulo de oblicuidad – Ángulo que forma el eje de un apoyo respecto de una recta normal al eje longitudinal del puente, es decir, un puente rectangular tiene un ángulo de oblicuidad de 0°.

Losa – Tablero compuesto por hormigón y armadura.

Ala esbelta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, ala de compresión con arriostramiento discreto que tiene una esbeltez para o por debajo de la cual la resistencia nominal a la flexión es determinada por el pandeo elástico local del ala, siempre que se satisfagan los requisitos sobre arriostramiento lateral necesarios.

Longitud esbelta no arriostrada – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, longitud no arriostrada límite de un ala de compresión con arriostramiento discreto para o por debajo de la cual la resistencia nominal a la flexión es determinada por el pandeo torsional lateral elástico.

Alma esbelta – En el caso de una sección compuesta en flexión negativa o de una sección no compuesta, alma con una esbeltez para o por debajo de la cual el alma alcanza la tensión teórica de pandeo elástico por flexión antes que el ala de compresión alcance la resistencia a la fluencia.

Relación de esbeltez – Relación entre la longitud efectiva de un elemento y el radio de giro de la sección transversal del elemento, ambos con respecto al mismo eje de flexión, o ancho o profundidad total o parcial de un componente dividido por su espesor.

Empalme – Grupo de conexiones abulonadas, o una conexión soldada, suficiente para transmitir el momento, corte, esfuerzo axial o par torsor entre dos elementos estructurales unidos por sus extremos de manera de formar un único elemento de mayor longitud.

Torsión de Saint-Venant – Parte de la torsión resistente interna de un elemento que solamente produce tensiones de corte puro en una sección transversal, también conocida como torsión pura o torsión uniforme.

Encofrado perdido – Encofrado permanente ya sea metálico o de hormigón que permanece en su sitio una vez finalizada la construcción.

Rigidizador – Elemento, generalmente un perfil o una placa, que se une a una placa o al alma de una viga con el objeto de distribuir las cargas, transmitir corte o evitar el pandeo del elemento al cual está unido.

Rigidez – Resistencia de un elemento o estructura a la deformación, medida como la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento correspondiente.

Endurecimiento por deformación – Fenómeno por el cual el acero dúctil, luego de sufrir una deformación considerable al llegar o inmediatamente después de pasar el punto de fluencia, tiene capacidad para resistir cargas considerablemente mayores que aquella que provocó la fluencia inicial.

Deformación correspondiente al inicio del endurecimiento por deformación – Para los aceros estructurales cuya relación tensión-deformación presenta una región plástica plana o prácticamente plana, valor de la deformación al iniciar el endurecimiento por deformación.

Rango de tensiones – Diferencia algebraica entre las tensiones extremas provocadas por el paso de una carga.

Subpanel – Panel de un alma rigidizada dividido por uno o más rigidizadores longitudinales.

Resistencia a la tracción – Máxima tensión de tracción que es capaz de soportar un material.

Acción de campo de tensiones – Comportamiento de un panel de viga bajo corte en el cual se desarrollan tensiones de tracción diagonal en el alma y fuerzas de compresión en los rigidizadores transversales de manera análoga a una cercha Pratt.

Puente de vigas con tablero inferior – Sistema de vigas en el cual la calzada se encuentra por debajo del ala superior.

Puente de celosía con tablero inferior – Sistema de celosía en el cual la calzada está ubicada cerca del cordón inferior y donde se provee un sistema superior de cordones laterales.

Placas de unión – Placas que se utilizan para conectar los diferentes componentes de un elemento.

Arco atirantado – Arco en el cual el empuje horizontal de la nervadura del arco es resistido mediante un tirante horizontal.

Talón del filete – Punto donde termina una soldadura de filete o el chaflán de una sección laminada.

Tensión de corte torsional – Tensión de corte inducida por la torsión de Saint-Venant.

Soldadura cargada transversalmente – Soldadura en la cual se aplica una tensión perpendicularmente al eje longitudinal de la misma.

Sección tipo artesa – Sección en forma de U que no tiene un ala superior común.

Arco verdadero – Arco en el cual la componente horizontal de la fuerza en la nervadura del arco es resistida por una fuerza externa provista por su fundación.

Viga tipo omega invertida – Viga de acero abierta en su parte superior compuesta por una placa que forma el ala inferior, dos placas que forman almas inclinadas o verticales, y un ala superior independiente unida a la parte superior de cada alma. Las alas superiores se conectan mediante elementos de arriostramiento lateral.

Longitud no arriostrada – Distancia entre puntos de arriostramiento que resisten el modo de pandeo o distorsión considerado.

Criterio de fluencia de Von Mises – Teoría que establece que, bajo una combinación de tensiones, la acción inelástica en un punto comienza cuando la energía de deformación por unidad de volumen es igual a la energía de deformación por unidad de volumen en una barra simple traccionada hasta el límite elástico bajo un estado uniaxial de tensiones. Esta teoría también se denomina teoría de la energía de deformación. De acuerdo con esta teoría, la fluencia por corte ocurre a 0.58 veces la resistencia a la fluencia.

Tensión de alabeo – Tensión normal inducida en la sección transversal debido a una torsión alabeada y/o a la distorsión de la sección transversal.

Torsión alabeada – Parte de la resistencia total a la torsión de un elemento que produce tensiones de corte y normales proporcionada por la resistencia al alabeo fuera del plano de la sección transversal.

Abolladura del alma – Falla local de una placa de alma en la proximidad inmediata de una carga concentrada o reacción de apoyo debido a la compresión transversal que introduce dicha carga.

Momento de fluencia – En un elemento solicitado a flexión, momento bajo el cual una fibra externa llega a la tensión de fluencia.

Resistencia a la fluencia – Tensión a la cual un material exhibe una desviación limitante determinada respecto de la proporcionalidad entre tensión y deformación.

Tensión de fluencia – Tensión determinada en un ensayo de tracción cuando la deformación específica llega a 0.005 mm por mm.

6.3 SIMBOLOGÍA

| | |
|--------------|---|
| A | = constante para las diferentes categorías para diseño a fatiga; área encerrada por los ejes de las placas de los elementos tipo cajón (mm^2) (6.6.1.2.5) (6.12.2.2.2) |
| A_b | = área de apoyo proyectada sobre una placa para pasador (mm^2) (6.8.7.2) (6.13.2.7) |
| A_c | = área de hormigón (mm^2); área del tablero de hormigón (mm^2) (6.9.5.1) (D6.3.2) |
| $A_{d, eff}$ | = área efectiva de la sección transversal de un tablero ortótropo, incluyendo los nervios longitudinales (mm^2) (6.14.3.3.2) |
| $ADTT$ | = tráfico medio diario correspondiente a camiones durante la vida de diseño (6.6.1.2.5) |
| $ADTT_{SL}$ | = $ADTT$ en un único carril (6.6.1.2.5) |
| A_e | = área de ala efectiva (mm^2) (6.13.6.1.4c) |
| A_f | = área del ala inferior inclinada (mm^2); área del ala de una sección tipo cajón, incluyendo los rigidizadores longitudinales del ala (mm^2); sumatoria del área de las placas de relleno en la parte superior e inferior de una placa de unión (mm^2); área del ala que transmite una carga concentrada (mm^2) (C6.10.1.4) (C6.11.11.2) (6.13.6.1.5) (6.13.7.2) |
| A_{fn} | = sumatoria del área de las alas y el área de cualquier cubrejuntas del lado del eje neutro correspondiente a D_n en una sección híbrida (mm^2) (6.10.1.10.1) |
| A_g | = área bruta de la sección transversal de un elemento comprimido (mm^2); área bruta de un ala (mm^2) (6.8.2.1) (6.10.1.8) |
| A_n | = área neta de la sección transversal de un elemento traccionado (mm^2); área neta de un ala (mm^2) (6.8.2.1) (6.10.1.8) |
| A_o | = área encerrada dentro de una sección tipo cajón (mm^2) (C6.7.4.3) |
| A_p | = menor valor entre el área de la placa conectada y la sumatoria del área de las platabandas en la parte superior e inferior de la placa conectada (mm^2) (6.13.6.1.5) |
| A_{pn} | = área de los elementos de un rigidizador que sobresalen más allá de las soldaduras entre el alma y un ala pero no más allá del borde del ala (mm^2) (6.10.11.2.3) |
| A_r | = área de la armadura longitudinal (mm^2) (6.9.5.1) |
| A_{rb} | = área de la capa inferior de armadura longitudinal dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón (mm^2) (D6.1) |
| A_{rs} | = área total de la armadura longitudinal dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón (mm^2) (D6.3.2) |
| A_{rt} | = área de la capa superior de armadura longitudinal dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón (mm^2) (D6.1) |
| A_s | = área de un perfil de acero estructural (mm^2); área total de armadura longitudinal sobre el apoyo interior dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón (mm^2); área de un rigidizador transversal intermedio o área total de ambos rigidizadores en el caso de los rigidizadores utilizados de a pares (mm^2); área bruta de una platabanda (mm^2); área del tablero de hormigón (mm^2) (6.9.4.1) (6.10.10.3) (6.10.11.1.4) (6.13.6.1.4c) (D6.3.2) |
| A_{sc} | = área de la sección transversal de un conector de corte tipo perno (mm^2) (6.10.10.4.3) |
| A_t | = área del ala de tracción (mm^2) (D6.3.2) |
| A_{tg} | = área bruta a lo largo del plano que soporta tensión de tracción por bloque de corte (mm^2) (6.13.4) |
| A_{tn} | = área neta a lo largo del plano que soporta tensión de tracción por bloque de corte (mm^2) (6.13.4) |
| A_v | = área de la armadura transversal que intercepta una fisura por corte diagonal en un perfil revestido de |

hormigón (mm²) (6.12.3.1)

| | | |
|-----------------|---|--|
| A_{vg} | = | área bruta a lo largo del plano que soporta tensión de corte por bloque de corte (mm ²) (6.13.4) |
| A_{vn} | = | área neta a lo largo del plano que soporta tensión de corte por bloque de corte (mm ²) (6.13.4) |
| A_w | = | área del alma de una sección de acero (mm ²) (6.12.12.3.1) |
| a | = | distancia entre centros de las alas de cajones adyacentes en una sección de múltiples cajones (mm); separación longitudinal entre rigidizadores de ala transversales (mm); distancia entre el centro de un bulón y el borde de una placa solicitada a una fuerza de tracción provocada por una acción de palanca (mm) (6.11.2.3) (C6.11.11.2) (6.13.2.10.4) |
| a_{wc} | = | relación entre dos veces el área del alma comprimida y el área del ala de compresión (6.10.1.10.2) |
| B | = | constante relacionada con el área de rigidizadores transversales requerida (6.10.11.1.4) |
| b | = | ancho de un elemento tipo placa rectangular (mm); ancho del cuerpo de una barra de ojo (mm); distancia entre el borde de una placa o el borde de una perforación y el punto de apoyo o distancia entre apoyos (mm); distancia libre entre placas (mm); ancho de un tubo rectangular (mm); espesor total de la sección transversal compuesta de un perfil de acero revestido de hormigón en el plano de pandeo (mm); distancia entre el centro de un bulón y el talón del chaflán de una parte conectada (mm) (C6.7.4.3) (6.7.6.3) (6.9.4.2) (6.12.2.2.2) (6.12.2.3.1) (6.13.2.10.4) (6.14.4.2) |
| b_c | = | ancho total del ala de compresión (mm) (D6.1) |
| b_f | = | ancho total del ala (mm); ancho total del ala más ancha dentro de la sección considerada (mm) (6.10.2.2) (6.10.11.1.2) |
| b_{fc} | = | ancho total del ala de compresión (mm); ancho del ala de una sección tipo cajón comprimida entre las almas (mm) (6.10.1.10.2) (6.11.8.2.2) |
| b_{ft} | = | ancho total del ala de tracción (mm); ancho del ala de una sección tipo cajón traccionada entre las almas (mm) (6.10.9.1) (6.11.9) |
| b_ℓ | = | ancho saliente de un rigidizador longitudinal (mm) (6.10.11.1.3) |
| b_s | = | ancho efectivo del tablero de hormigón (mm) (6.10.1.10.2) |
| b_t | = | ancho saliente de un rigidizador transversal o de apoyo (mm); ancho total del ala de tracción (mm) (6.10.11.1.2) (D6.1) |
| C | = | relación entre la resistencia al pandeo por corte y la resistencia mínima a la fluencia especificada para corte (6.10.9.2) |
| C_b | = | modificador del gradiente de momentos (6.10.1.6) |
| C_1, C_2, C_3 | = | constantes para columnas compuestas especificadas en la Tabla 6.9.5.1-1 (6.9.5.1) |
| c | = | distancia entre el centro de la armadura longitudinal y la cara más próxima de un perfil revestido de hormigón en el plano de flexión (mm) (6.12.2.3.1) |
| c_{rb} | = | distancia entre la cara superior del tablero de hormigón y la línea de centro de la capa inferior de armadura longitudinal del tablero de hormigón (mm) (D6.1) |
| c_{rt} | = | distancia entre la cara superior del tablero de hormigón y la línea de centro de la capa superior de armadura longitudinal del tablero de hormigón (mm) (D6.1) |
| D | = | diámetro de un perno (mm); diámetro exterior de un tubo de acero de sección circular (mm); profundidad del alma (mm); profundidad de la placa de alma medida a lo largo de la pendiente (mm) (6.7.6.2.1) (6.9.4.2) (6.10.1.9.1) (6.11.9) |
| D' | = | profundidad a la cual una sección compuesta alcanza su capacidad teórica de momento plástico cuando la deformación máxima en el tablero de hormigón corresponde a su deformación de aplastamiento teórica (mm) |

(C6.10.7.3)

| | |
|-----------|---|
| D_c | = profundidad del alma comprimida en el rango elástico (mm) (6.10.1.9.1) |
| $DC1$ | = carga permanente que actúa sobre la sección no compuesta (C6.10.11.3.1) |
| $DC2$ | = carga permanente que actúa sobre la sección compuesta a largo plazo (C6.10.11.3.1) |
| D_{cp} | = profundidad del ala comprimida cuando se produce el momento plástico (mm) (6.10.6.2.2) |
| D_n | = mayor valor entre la distancia desde el eje neutro elástico de la sección transversal hasta la cara interna de cualquiera de las alas en una sección híbrida, o la distancia desde el eje neutro hasta la cara interna del ala del lado del eje neutro donde primero ocurre la fluencia cuando el eje neutro se encuentra a la mitad de la profundidad del alma (mm) (6.10.1.10.1) |
| D_p | = distancia entre la cara superior del tablero de hormigón y el eje neutro de la sección compuesta cuando se produce el momento plástico (mm) (6.10.7.1.2) |
| D_t | = profundidad total de una sección compuesta (mm) (6.10.7.1.2) |
| DW | = carga correspondiente a la superficie de rodamiento (C6.10.11.3.1) |
| d | = profundidad total de la sección de acero (mm); diámetro de un conector de corte tipo perno (mm); profundidad del elemento en el plano de flexión (mm); profundidad del elemento en el plano de corte (mm); diámetro nominal de un bulón (mm) (C6.10.8.2.3) (6.10.10.2) (6.12.2.3.1) (6.12.3.1) (6.13.2.4.2) |
| d_b | = profundidad de una viga en un pórtico rígido (mm) (6.13.7.2) |
| d_c | = profundidad de una columna en un pórtico rígido (mm); distancia entre el eje neutro plástico y la mitad del espesor del ala de compresión que se utiliza para calcular el momento plástico (mm) (6.13.7.2) (D6.1) |
| d_o | = separación entre rigidizadores transversales (mm) (6.10.9.3.2) |
| d_{rb} | = distancia entre el eje neutro plástico y la línea de centro de la capa inferior de armadura longitudinal del tablero de hormigón que se utiliza para calcular el momento plástico (mm) (D6.1) |
| d_{rt} | = distancia entre el eje neutro plástico y la línea de centro de la capa superior de armadura longitudinal del tablero de hormigón que se utiliza para calcular el momento plástico (mm) (D6.1) |
| d_s | = distancia entre la línea de centro del rigidizador longitudinal tipo placa más próximo, o desde la línea de sujetadores perpendicular a la dirección de la carga del rigidizador longitudinal tipo ángulo más próximo, y la superficie interior o rama del ala comprimida (mm); distancia entre el eje neutro plástico y la mitad del espesor del tablero de hormigón que se utiliza para calcular el momento plástico (mm) (6.10.1.9.2) (D6.1) |
| d_t | = distancia entre el eje neutro plástico y la mitad del espesor del ala de tracción que se utiliza para calcular el momento plástico (mm) (D6.1) |
| d_w | = distancia entre el eje neutro plástico y la mitad de la profundidad del alma que se utiliza para calcular el momento plástico (mm) (D6.1) |
| E | = módulo de elasticidad del acero (MPa) (6.9.4.1) |
| E_c | = módulo de elasticidad del hormigón (MPa) (6.10.1.1.1b) |
| E_e | = módulo de elasticidad modificado del acero para una columna compuesta (MPa) (6.9.5.1) |
| EXX | = número de clasificación de los metales de soldadura (C6.13.3.2.1) |
| F_{cf} | = tensión de diseño para el ala determinante en un punto de empalme (MPa) (C6.13.6.1.4b) |
| FCM | = elemento de fractura crítica (6.6.2) |
| F_{cr} | = tensión crítica de pandeo para placas (MPa); tensión de pandeo lateral torsional elástico (MPa) (C6.9.4.2) (6.10.1.6) |
| F_{crs} | = tensión de pandeo local elástico para un rigidizador transversal (MPa) (6.10.11.1.4) |

| | | |
|---------------|---|---|
| F_{crw} | = | resistencia nominal al pandeo flexional del alma (MPa) (6.10.1.9.1) |
| F_e | = | resistencia nominal a la compresión de los elementos compuestos (MPa) (6.9.5.1) |
| F_{exx} | = | clasificación de la resistencia del metal de soldadura (MPa) (6.13.3.2.2b) |
| F_ℓ | = | fuerza lateral uniformemente distribuida estáticamente equivalente debida a las cargas mayoradas de las ménsulas del vuelo del tablero de hormigón (N/mm) (C6.10.3.4) |
| FLB | = | pandeo local del ala |
| F_{max} | = | máxima resistencia potencial a la flexión del ala de compresión (MPa) (C6.10.8.2.1) |
| F_n | = | resistencia nominal a la flexión de un ala (MPa) (C6.10.8.2.1) |
| F_{nc} | = | resistencia nominal a la flexión de un ala de compresión (MPa) (C6.8.2.3) |
| $F_{nc(FLB)}$ | = | resistencia nominal al pandeo flexional local del ala de compresión (MPa) (CD6.4.1) |
| F_{nt} | = | resistencia nominal a la flexión de un ala de tracción (MPa) (C6.8.2.3) |
| F_s | = | fuerza vertical en la conexión entre un rigidizador de ala longitudinal y uno transversal (N); tensión de diseño correspondiente a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II para el ala considerada en un punto de empalme (MPa) (C6.11.11.2) (6.13.6.1.4c) |
| F_u | = | mínima resistencia a la tracción especificada del acero (MPa); mínima resistencia a la tracción especificada de un conector de corte tipo perno (MPa); mínima resistencia a la tracción especificada de una parte conectada (MPa) (6.4.1) (6.10.10.4.3) (6.13.2.9) |
| F_{ub} | = | mínima resistencia a la tracción especificada de un bulón (MPa) (6.13.2.7) |
| F_{vr} | = | resistencia al corte torsional mayorada de un ala de una sección tipo cajón (MPa) (6.11.1.1) |
| F_w | = | fuerza vertical en la conexión entre un rigidizador de ala transversal y el alma de una sección tipo cajón (MPa) (C6.11.11.2) |
| F_y | = | mínima resistencia a la fluencia especificada del acero (MPa); mínima resistencia a la fluencia especificada de un perno (MPa); mínima resistencia a la fluencia especificada de una placa para pasador (MPa); mínima resistencia a la fluencia especificada de una parte conectada (MPa); mínima resistencia a la fluencia especificada de una platabanda (MPa) (6.4.1) (6.7.6.2.1) (6.8.7.2) (6.13.4) (6.13.6.1.4c) |
| F_{yc} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de un ala de compresión (MPa) (C6.8.2.3) |
| F_{yf} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de un ala (MPa) (6.10.1.6) |
| F_{yr} | = | tensión en el ala de compresión cuando se inicia la fluencia nominal en la sección transversal, considerando los efectos de las tensiones residuales pero sin considerar la flexión lateral del ala de compresión, tomado como el menor valor entre $0.7F_{yc}$ y F_{yws} , pero nunca menor que $0.5F_{yc}$ (MPa) (6.10.8.2.2-6) |
| F_{yrb} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de la capa inferior de armadura longitudinal del tablero de hormigón (MPa) (D6.1) |
| F_{yrs} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de la armadura longitudinal del tablero de hormigón (MPa) (D6.3.2) |
| F_{yrt} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de la capa superior de armadura longitudinal del tablero de hormigón (MPa) (D6.1) |
| F_{ys} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de un rigidizador (MPa) (6.10.11.1.2) |
| F_{yt} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de un ala de tracción (MPa) (C6.8.2.3) |
| F_{yw} | = | mínima resistencia a la fluencia especificada de un alma (MPa) (6.10.1.10.1) |
| f | = | rango de tensiones axiales o de interacción en diferentes componentes de un tablero ortótropo (MPa); flujo de corte en una sección tipo cajón (N/mm) (6.6.1.2.3) (C6.11.1.1) |

| | |
|--------------|--|
| f_0 | = tensión debida a las cargas mayoradas sin considerar la flexión lateral del ala en un punto de arriostramiento opuesto al punto correspondiente a f_2 , calculada a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión; las tensiones de compresión se consideran positivas, las de tracción negativas (MPa) (6.10.8.2.3) |
| f_1 | = rango de tensiones axiales en diferentes componentes de un tablero ortótropo (MPa); tensión en el extremo de una longitud arriostrada opuesto a f_2 que representa la intercepción de la distribución lineal de tensiones más crítica supuesta a través ya sea de f_2 y f_{mid} , o bien a través de f_2 y f_0 , tomada como $2f_{mid} - f_2 \geq f_0$ (MPa) (C6.6.1.2.3) (6.10.8.2.3) |
| f_2 | = rango de tensiones de flexión local en diferentes componentes de un tablero ortótropo provocado por la interacción entre los nervios y las vigas de tablero (MPa); mayor de las tensiones de compresión debidas a las cargas mayoradas sin considerar la flexión lateral en los extremos de una longitud no arriostrada calculada a partir del valor crítico de la envolvente de momentos; el valor de f_2 es siempre positivo, a menos que en ambos extremos de la longitud no arriostrada la tensión sea nula o de tracción, en cuyo caso f_2 se toma igual a cero (MPa) (C6.6.1.2.3) (6.10.8.2.3) |
| f_a | = tensión axial debida a las cargas mayoradas en un arco de alma llena (MPa) (6.14.4.2) |
| f_b | = máxima tensión debida a las cargas mayoradas, incluyendo la amplificación de momentos, en un arco de alma llena (MPa) (6.14.4.2) |
| f_{bm} | = mayor valor de la tensión de compresión debida a las cargas mayoradas en el ala considerada, calculada sin considerar la flexión lateral del ala, en la totalidad de una longitud no arriostrada (MPa) (6.10.1.6) |
| f_{bu} | = tensión en el ala calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa) (6.10.1.6) |
| f_{by} | = tensión en el ala de una sección tipo cajón en una pila interior provocada por las cargas mayoradas debidas a la flexión del diafragma interno respecto del eje mayor sobre la placa de asiento (MPa) (C6.11.8.1.1) |
| f_c | = tensión en el ala de compresión debida a las cargas correspondientes a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa); sumatoria de las diferentes tensiones de flexión en el ala de compresión que provocan las diferentes cargas, es decir, $DC1$, $DC2$, DW y $LL+IM$, actuando sobre sus respectivas secciones (MPa) (6.10.4.2.2) (D6.3.1) |
| f'_c | = mínima resistencia a la compresión especificada del hormigón a 28 días (MPa) (6.9.5.1) |
| f_{cf} | = máxima tensión de flexión debida a las cargas mayoradas a la mitad de espesor del ala determinante en un punto de empalme (MPa) (6.13.6.1.4c) |
| f_d | = tensión de corte en el ala de una sección tipo cajón en una pila interior provocada por el corte vertical del diafragma interno debido a las cargas mayoradas (MPa) (C6.11.8.1.1) |
| f_{DC1} | = tensión en el ala de compresión provocada por la carga permanente mayorada aplicada antes que el tablero se haya endurecido o se haya vuelto compuesto, calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa) (6.10.1.10.2) |
| f_{DC2} | = tensión en el ala de compresión provocada por la carga permanente mayorada que actúa sobre la sección compuesta a largo plazo, calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa) (6.10.11.3.1) |
| f_f | = tensión en el ala debida a las cargas correspondientes a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II sin considerar la flexión lateral del ala (MPa) (6.10.4.2.2) |
| f_g | = tensión axial global en un tablero ortótropo (MPa) (6.14.3.3.2) |
| f_ℓ | = tensión de flexión lateral del ala (MPa); tensión de flexión lateral de segundo orden del ala de compresión (MPa); tensión de flexión lateral del ala debida a las cargas correspondientes a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II (MPa); tensión de flexión lateral en el ala considerada en una sección en una pila interior (MPa) (6.10.1.6) (6.10.4.2.2) (B6.4.2.1) |
| $f_{\ell 1}$ | = tensión de flexión lateral de primer orden del ala de compresión en una sección, o máxima tensión de flexión lateral de primer orden en el ala de compresión en la totalidad de la longitud no arriostrada, según |

corresponda (MPa) (6.10.1.6)

- f_{LL+IM} = tensión en el ala de compresión provocada por las sobrecargas vehiculares mayoradas más las cargas de impacto que actúan sobre la sección compuesta a corto plazo, calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa) (C6.10.11.3.1)
- f_{mid} = tensión debida a las cargas mayoradas sin considerar la flexión lateral del ala a la mitad de la longitud no arriostrada del ala considerada, calculada a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión; las tensiones de compresión se consideran positivas, las de tracción negativas (MPa) (6.10.8.2.3)
- f_n = tensión normal en el ala inferior inclinada de un elemento de profundidad de alma variable (MPa); mayor de las resistencias a la fluencia mínimas especificadas de cada componente incluido en el cálculo de A_{fn} para una sección híbrida cuando la fluencia ocurre primero en uno de los componentes, o mayor de las tensiones elásticas en cada componente del lado del eje neutro correspondiente a D_n cuando ocurre la primera fluencia del lado opuesto del eje neutro (MPa) (C6.10.1.4) (6.10.1.10.1)
- f_{ncf} = tensión de flexión debida a las cargas mayoradas a la mitad del espesor del ala no determinante en un punto de empalme concurrente con f_{cf} (MPa) (C6.13.6.1.4b)
- f_{os} = tensión de flexión debida a las cargas para Estado Límite de Servicio II a la mitad del espesor de la otra ala en un punto de empalme concurrente con f_s en el ala considerada (MPa) (C6.13.6.1.4b)
- f_r = módulo de rotura del hormigón (MPa) (6.10.1.7)
- f_s = tensión de flexión debida a las cargas mayoradas en un rigidizador de alma longitudinal (MPa); mayor de las tensiones longitudinales debidas a las cargas mayoradas en los paneles del ala de una sección tipo cajón a ambos lados de un rigidizador de ala transversal (MPa); máxima tensión de flexión debida a las cargas para Estado Límite de Servicio II a la mitad del espesor del ala considerada en un punto de empalme (MPa) (6.10.11.3.1) (C6.11.11.2) (C6.13.6.1.4b)
- f_{sr} = rango de tensiones de flexión en la armadura longitudinal sobre una pila interior (MPa) (6.10.10.3)
- f_t = tensión debida a las cargas mayoradas sobre el área bruta de un ala de tracción calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa); sumatoria de las diferentes tensiones de flexión en el ala de tracción provocadas por las diferentes cargas, es decir, $DC1$, $DC2$, DW y $LL+IM$, actuando sobre sus respectivas secciones (MPa) (6.10.1.8) (D6.3.1)
- f_v = tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala de una sección tipo cajón debida a las cargas mayoradas (MPa) (6.11.3.2)
- f_{vg} = tensión de corte global en un tablero isótropo (MPa) (6.14.3.3.2)
- f_{xx} = diversas tensiones de flexión en el ala comprimida provocadas por las diferentes cargas mayoradas, es decir, $DC1$, $DC2$, DW y $LL+IM$, actuando sobre sus respectivas secciones (MPa) (6.10.11.3.1)
- G = módulo de corte del acero (MPa) (C6.12.2.2.2)
- g = distancia entre líneas de bulones (mm); separación horizontal de los bulones en la dirección de la carga en un empalme de alma (mm) (6.8.3) (C6.13.6.1.4b)
- H = garganta efectiva de una soldadura de filete (mm) (6.6.1.2.5)
- H_{uw} = fuerza horizontal de diseño resultante a la mitad de la profundidad del alma en un punto de empalme (N) (C6.13.6.1.4b)
- h = profundidad entre la línea de centro de las alas (mm) (C6.10.8.2.3)
- I = momento de inercia de la sección compuesta a corto plazo, u opcionalmente, en regiones de flexión negativa, momento de inercia de la sección de acero más la armadura longitudinal si al calcular el rango de tensiones longitudinales el hormigón no se considera efectivo para resistir tracción (mm^4); momento de inercia del diafragma interno de una sección tipo cajón en una pila interior (mm^4) (6.10.10.1.2)

(C6.11.8.1.1)

| | |
|-----------|---|
| I_ℓ | = momento de inercia de un rigidizador de alma longitudinal, incluyendo un ancho de alma efectivo tomado respecto del eje neutro de la sección combinada (mm^4); momento de inercia requerido para un rigidizador de ala longitudinal respecto de un eje paralelo al ala de una sección tipo cajón y tomado en la base del rigidizador (mm^4) (6.10.11.1.3) (6.11.11.2) |
| I_p | = momento de inercia polar de un grupo de bulones en un empalme de alma (mm^2) (C6.13.6.1.4b) |
| I_s | = momento de inercia real de un rigidizador de ala longitudinal respecto de un eje paralelo al ala de una sección tipo cajón y tomado en la base del rigidizador (mm^4); momento de inercia de un rigidizador de nervadura de arco (mm^4) (6.11.8.2.3) (6.14.4.2) |
| I_t | = momento de inercia de un rigidizador de alma transversal respecto del borde en contacto con el alma en el caso de rigidizadores simples y respecto de la mitad del espesor del alma en el caso de pares de rigidizadores (mm^4); momento de inercia de un rigidizador de ala transversal respecto de un eje que pasa por su baricentro y es paralelo a su borde inferior (mm^4) (6.10.11.1.3) (C6.11.11.2) |
| I_y | = momento de inercia de un elemento de sección tipo cajón respecto de un eje perpendicular al eje de flexión (mm^4) (6.12.2.2.2) |
| I_{yc} | = momento de inercia del ala de compresión de una sección de acero respecto del eje vertical en el plano del alma (mm^4) (6.10.2.2) |
| I_{yt} | = momento de inercia del ala de tracción de una sección de acero respecto del eje vertical en el plano del alma (mm^4) (6.10.2.2) |
| IM | = incremento por carga dinámica del Artículo 3.6.2 |
| J | = inercia torsional (mm^4) ; relación requerida entre la rigidez de un rigidizador de alma transversal y la de la placa que forma el alma (C6.7.4.3) (6.10.11.1.3) |
| K | = factor de longitud efectiva (6.9.3) |
| K_h | = factor que considera el tamaño de orificio en las uniones abulonadas (6.13.2.8) |
| K_s | = factor que considera la condición de las superficies en las uniones abulonadas (6.13.2.8) |
| $K\ell/r$ | = relación de esbeltez (6.9.3) |
| k | = coeficiente de pandeo de placas especificado en la Tabla 6.9.4.2-1; coeficiente de pandeo elástico por flexión del alma; coeficiente de pandeo por corte para almas; coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme en las alas de secciones tipo cajón; distancia entre la cara exterior del ala y el talón del chaflán del alma de un elemento de un pórtico rígido a rigidizar (mm); factor de estabilidad de placas para una nervadura de arco especificado en la Tabla 6.14.4.2-1; distancia desde la cara exterior de un ala que resiste una carga concentrada o una reacción de apoyo hasta el talón del chaflán del alma (mm) (6.9.4.2) (6.10.1.9.1) (6.10.9.3.2) (6.11.8.2.2) (6.13.7.2) (6.14.4.2) (D6.5.2) |
| k_c | = coeficiente de pandeo local del ala (6.9.4.2) |
| k_s | = coeficiente de pandeo de placas para tensión de corte en el ala de una sección tipo cajón (6.11.8.2.2) |
| k_{sf} | = coeficiente de pandeo elástico por flexión del alma para condiciones de borde longitudinal totalmente restringido (C6.10.1.9.1) |
| k_{ss} | = coeficiente de pandeo elástico por flexión del alma para condiciones de borde longitudinal simplemente apoyado (C6.10.1.9.1) |
| L | = longitud de cada tramo de viga para su envío (mm); distancia desde un único bulón hasta el borde libre del elemento medida de forma paralela a la línea de aplicación de la fuerza (mm) (C6.10.3.4) (C6.13.2.9) |
| L_b | = longitud no arriostrada (mm) (6.10.1.6) |
| L_c | = longitud de un conector de corte tipo canal (mm); distancia libre entre orificios para bulones o entre el |

| | |
|----------|--|
| | orificio para el bulón y el extremo del elemento en la dirección de la fuerza de aplastamiento aplicada (mm) (6.10.10.4.3) (6.13.2.9) |
| L_{cp} | = longitud de un cubrejuntas (mm) (6.10.12.1) |
| LFD | = diseño por factores de carga |
| LL | = sobrecarga vehicular |
| L_p | = longitud no arriostrada límite para alcanzar la resistencia nominal a flexión $R_b R_h F_{yc}$ bajo flexión uniforme (mm) (6.10.1.6) |
| L_r | = longitud no arriostrada límite para llegar al inicio de la fluencia nominal en cualquiera de las alas bajo flexión uniforme considerando los efectos de las tensiones residuales en el ala de compresión (mm) (6.10.8.2.3) |
| $LRFD$ | = diseño por factores de carga y resistencia |
| LTB | = pandeo lateral torsional |
| ℓ | = longitud no arriostrada de un elemento (mm) (6.8.4) |
| M | = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal (N-mm) (C6.10.1.4) |
| M_0 | = momento flector debido a las cargas mayoradas en un punto de arriostramiento opuesto al correspondiente a M_2 , calculado a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto en el ala considerada, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión; cuando el momento provoca compresión en el ala considerada se considera positivo, cuando provoca tracción se considera negativo (N-mm) (A6.3.3) |
| M_1 | = momento flector en el extremo de una longitud no arriostrada opuesto a M_2 que representa la intercepción de la distribución lineal de tensiones más crítica supuesta a través ya sea de M_2 y M_{mid} , o bien a través de M_2 y M_0 , tomado como $2M_{mid} - M_2 \geq M_0$ (N-mm); momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal en el punto de arriostramiento con el menor momento debido a las cargas mayoradas adyacente a una sección de una pila interior a partir de la cual se redistribuyen momentos, tomado ya sea como el valor máximo o mínimo de la envolvente de momentos, cualquiera sea el valor que produzca la menor longitud no arriostrada admisible (N-mm) (A6.3.3) (B6.2.4) |
| M_2 | = mayor momento flector respecto del eje principal debido a las cargas mayoradas en cualquiera de los extremos de una longitud no arriostrada que produce compresión en el ala considerada, calculado a partir del valor crítico de la envolvente de momentos; el valor de M_2 siempre se considera positivo, a menos que el momento sea nulo o provoque tracción en el ala considerada en ambos extremos de la longitud no arriostrada, en cuyo caso M_2 se toma igual a cero (N-mm); momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal en el punto de arriostramiento con el mayor momento debido a las cargas mayoradas adyacente a una sección de una pila interior a partir de la cual se redistribuyen momentos, tomado como el valor crítico de la envolvente de momentos (N-mm) (A6.3.3) (B6.2.4) |
| M_{AD} | = momento flector adicional que se debe aplicar a la sección compuesta a corto plazo para provocar la fluencia nominal en cualquiera de las alas de acero (N-mm) (D6.2.2) |
| M_{bm} | = mayor valor del momento flector respecto del eje mayor debido a las cargas mayoradas en la totalidad de una longitud no arriostrada que provoca compresión en el ala considerada (N-mm) (6.10.1.6) |
| M_c | = momento de columna debido a las cargas mayoradas en un pórtico rígido (N-mm) (6.13.7.2) |
| M_{cr} | = momento de pandeo lateral torsional elástico (N-mm) (C6.12.2.2.2) |
| M_{D1} | = momento flector provocado por la carga permanente mayorada aplicada antes que el tablero de hormigón se haya endurecido o se haya vuelto compuesto (N-mm) (D6.2.2) |
| M_{D2} | = momento flector provocado por la carga permanente mayorada que se aplica a la sección compuesta a largo plazo (N-mm) (D6.2.2) |
| M_e | = valor crítico de la envolvente de momentos debido a las cargas mayoradas en una sección de una pila interior |

a partir de la cual se redistribuyen momentos (N-mm) (B6.3.3.1)

| | |
|------------------|--|
| M_{fb} | = momento aplicado debido a las cargas mayoradas en una viga transversal que soporta un tablero ortótropo (N-mm) (6.14.3.4) |
| M_{ft} | = momento transversal aplicado debido a las cargas mayoradas que actúan en una placa de tablero ortótropo debido a que la placa transmite las cargas de rueda a los nervios longitudinales adyacentes (N-mm) (6.14.3.4) |
| M_{ℓ} | = momento de flexión lateral en las alas debido a las cargas excéntricas de las ménsulas del vuelo del tablero de hormigón (N-mm) (C6.10.3.4) |
| M_{max} | = máxima resistencia potencial a la flexión en base al ala de compresión (N-mm) (C6.10.8.2.1) |
| M_{mid} | = momento flector respecto del eje mayor debido a las cargas mayoradas a la mitad de una longitud no arriostrada, calculado a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto en el ala considerada, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión; cuando el momento provoca compresión en el ala considerada se considera positivo, cuando provoca tracción se considera negativo (N-mm) (A6.3.3) |
| M_n | = resistencia nominal a la flexión de una sección (N-mm) (6.10.7.1.1) |
| M_{nc} | = resistencia nominal a la flexión en base al ala de compresión (N-mm) (C6.8.2.3) |
| $M_{nc(FLB)}$ | = resistencia nominal a la flexión en base al pandeo local del ala de compresión (N-mm) (CD6.4.2) |
| M_{st} | = resistencia nominal a la flexión en base al ala de tracción (N-mm) (C6.8.2.3) |
| M_p | = momento plástico (N-mm) (6.10.7.1.2) |
| M_{pe} | = momento plástico efectivo en flexión negativa en secciones correspondientes a una pila interior a partir de las cuales se redistribuyen momentos (N-mm) (B6.3.3.1) |
| M_{ps} | = resistencia al momento plástico de la sección de acero de un elemento revestido de hormigón (N-mm) (6.12.2.3.1) |
| M_r | = resistencia mayorada a la flexión (N-mm) (6.12.1.2.1) |
| M_{rb} | = resistencia mayorada a la flexión de una viga transversal que soporta un tablero ortótropo (N-mm) (6.14.3.4) |
| M_{rd} | = momento de redistribución (N-mm) (B6.3.3.1) |
| M_{rr} | = resistencia mayorada a la flexión de un nervio longitudinal de un tablero ortótropo (N-mm) (6.14.3.3.2) |
| M_{rt} | = resistencia a la flexión mayorada de una placa de tablero ortótropo que transmite las cargas de rueda a los nervios adyacentes (N-mm) (6.14.3.4) |
| M_{rx}, M_{ry} | = resistencia mayorada a la flexión respecto de los ejes x e y, respectivamente (N-mm) (6.8.2.3) |
| M_u | = momento debido a las cargas mayoradas (N-mm); momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal (N-mm) (6.7.6.2.1) (6.10.1.6) |
| M_{ur} | = momento de flexión local mayorado en un nervio longitudinal de un tablero ortótropo (N-mm) (6.14.3.3.2) |
| M_{uw} | = momento de diseño a la mitad de la profundidad del alma en un punto de empalme (N-mm) (C6.13.6.1.4b) |
| M_{ux}, M_{uy} | = momentos flectores debidos a las cargas mayoradas respecto de los ejes x e y, respectivamente (N-mm) (6.8.2.3) |
| M_y | = momento de fluencia (N-mm) (6.10.7.1.2) |
| M_{yc} | = momento de fluencia con respecto al ala de compresión (N-mm); momento de fluencia de la sección compuesta de un perfil revestido de hormigón (N-mm) (C6.8.2.3) (6.12.2.3.1) |
| M_{yt} | = momento de fluencia con respecto al ala de tracción (N-mm) (C6.8.2.3) |
| M_{yr} | = momento flector respecto del eje mayor cuando se inicia la fluencia nominal en cualquiera de las alas o en el alma, considerando los efectos de las tensiones residuales pero sin considerar la flexión lateral de las alas (N- |

| | |
|----------|---|
| | mm) (C6.10.8.2.1) |
| m | = número de líneas verticales de bulones en un empalme de alma (C6.13.6.1.4b) |
| N | = número de ciclos del rango de tensiones; longitud de apoyo, tomada mayor o igual que k en las ubicaciones de los apoyos extremos (mm) (6.6.1.2.5) (D6.5.2) |
| NDT | = ensayos no destructivos |
| N_s | = número de planos de corte por bulón; número de planos de deslizamiento por bulón (6.13.2.7) (6.13.2.8) |
| n | = número de ciclos por pasada de camión; relación de módulos; número de conectores de corte en una sección transversal; mínimo número de conectores de corte en la región considerada; número de rigidizadores de ala longitudinales igualmente espaciados; número de bulones en una línea vertical de un empalme de alma (6.6.1.2.5) (6.9.5.1) (6.10.10.1.2) (6.10.10.4.1) (6.11.8.2.3) (C6.13.6.1.4b) |
| n_{ac} | = número de conectores de corte adicionales que se requieren en las regiones donde hay puntos de contraflexión bajo carga permanente para aquellas secciones que no son compuestas en las regiones de flexión negativa (6.10.10.3) |
| P | = fuerza de corte nominal total en el tablero de hormigón para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia (N) (6.10.10.4.1) |
| P_{1n} | = fuerza longitudinal en la viga sobre un apoyo interior para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia (N) (6.10.10.4.2) |
| P_{1p} | = fuerza longitudinal en el tablero de hormigón en el punto de máxima sobrecarga positiva más momento de impacto para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia (N) (6.10.10.4.2) |
| P_{2n} | = fuerza longitudinal en el tablero de hormigón sobre un apoyo interior para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia (N) (6.10.10.4.2) |
| P_{2p} | = fuerza longitudinal en la viga en el punto de máxima sobrecarga positiva más momento de impacto para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia (N) (6.10.10.4.2) |
| P_c | = fuerza plástica en el ala de compresión utilizada para calcular el momento plástico (N) (D6.1) |
| P_h | = componente horizontal de la fuerza en el ala inferior inclinada de un elemento de profundidad de alma variable (N) (C6.10.1.4) |
| P_ℓ | = fuerza lateral concentrada estáticamente equivalente de las ménsulas del vuelo del tablero de hormigón colocada en la mitad de la longitud no arriostrada (N) (C6.10.3.4) |
| P_n | = resistencia nominal al aplastamiento en placas para pasadores (N); resistencia nominal a la compresión axial (N); fuerza de corte longitudinal total en el tablero de hormigón sobre un apoyo interior para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia, tomada como el menor valor entre P_{1n} y P_{2n} (N) (6.8.7.2) (6.9.2.1) (6.10.10.4.2) |
| P_{nu} | = resistencia nominal a la tracción axial para fractura en la sección neta (N) (6.8.2.1) |
| P_{ny} | = resistencia nominal a la tracción axial para fluencia en la sección bruta (N) (6.8.2.1) |
| P_p | = fuerza de corte longitudinal total en el tablero de hormigón en el punto de máxima sobrecarga positiva más momento de impacto para el diseño de los conectores de corte en el Estado Límite de Resistencia, tomada como el menor valor entre P_{1p} y P_{2p} (N) (6.10.10.4.2) |
| P_r | = resistencia mayorada a la tracción o compresión axial (N); resistencia mayorada al aplastamiento en placas para pasadores (N); resistencia axial mayorada de los rigidizadores de apoyo (N); resistencia nominal a la flexión de un tablero ortótropo, considerando el ancho efectivo del tablero (N); resistencia mayorada a la compresión axial de una pila de acero (N) (6.8.2.1) (6.8.7.2) (6.10.11.2.4a) (6.14.3.3.2) (6.15.3.1) |
| P_{rb} | = fuerza plástica en la capa inferior de armadura longitudinal del tablero usada para calcular el momento plástico (N) (D6.1) |

| | |
|--------------|--|
| P_{rt} | = fuerza plástica en la capa superior de armadura longitudinal del tablero usada para calcular el momento plástico (N) (D6.1) |
| P_s | = fuerza plástica de compresión en el tablero de hormigón usada para calcular el momento plástico (N) (D6.1) |
| P_t | = mínima tensión requerida en el bulón (N); fuerza plástica en el ala de tracción usada para calcular el momento plástico (N) (6.13.2.8) (D6.1) |
| P_u | = fuerza axial aplicada debida a las cargas mayoradas (N); tracción directa o esfuerzo de corte que actúa sobre un bulón debido a las cargas mayoradas (N); tracción global debida a las cargas mayoradas que actúan sobre un tablero ortótropo (N) (6.8.2.3) (6.13.2.10.4) (6.13.2.11) (6.14.3.3.2) |
| P_v | = componente vertical de la fuerza en el ala inferior inclinada de un elemento de profundidad de alma variable (N) (C6.10.1.4) |
| P_w | = fuerza plástica en el alma usada para calcular el momento plástico (N) (D6.1) |
| p | = separación de los conectores de corte a lo largo del eje longitudinal (mm); separación alternada entre dos líneas adyacentes de orificios para bulones en tresbolillo (mm) (6.10.10.1.2) (6.13.2.6.3) |
| Q | = primer momento del área transformada a corto plazo del tablero de hormigón respecto del eje neutro de la sección compuesta a corto plazo, u opcionalmente, en regiones de flexión negativa, primer área de la armadura longitudinal respecto del eje neutro de la sección compuesta si al calcular el rango de tensiones longitudinales el hormigón no se considera efectivo para resistir tracción (mm^3); primer momento de la mitad del área efectiva del ala de la sección tipo cajón en una pila interior respecto del eje neutro de la sección efectiva del diafragma interno (mm^3) (6.10.10.1.2) (C6.11.8.1.1) |
| Q_n | = resistencia nominal al corte de un conector de corte individual (N) (6.10.10.4.1) |
| Q_r | = resistencia al corte mayorada de un conector de corte individual (N) (6.10.10.4.1) |
| Q_u | = tracción debida a la acción de palanca en cada bulón debida a las cargas mayoradas (N) (6.13.2.10.4) |
| R | = radio de transición de los accesorios soldados como se ilustra en la Figura 6.6.1.2.3-1 (mm); factor de reducción que se aplica a la resistencia al corte mayorada de los bulones que atraviesan placas de relleno (6.6.1.2.3) (6.13.6.1.5) |
| R_1 | = constante que cuando se la multiplica por $\sqrt{kE/F_{yc}}$ define la relación de esbeltez para un ala de una sección tipo cajón que es igual a 0.6 veces la esbeltez del ala para la cual la tensión de pandeo elástico del ala es igual a la resistencia para fluencia bajo una combinación de tensión normal y corte (6.11.8.2.2) |
| R_2 | = constante que cuando se la multiplica por $\sqrt{kE/F_{yc}}$ define la relación de esbeltez para un ala de una sección tipo cajón que es igual a la esbeltez del ala para la cual la tensión de pandeo elástico del ala es igual a F_{yr} (6.11.8.2.2) |
| R_b | = factor de balanceo de las cargas del alma (6.10.1.6) |
| R_{cf} | = valor absoluto de la relación entre F_{cf} y f_{cf} en un punto de empalme (C6.13.6.1.4b) |
| R_h | = factor de hibridez (6.10.1.10.1) |
| R_n | = resistencia nominal de un bulón, conexión o material conectado (N) o (MPa); resistencia nominal a una carga concentrada (N) (6.13.2.2) (D6.5.2) |
| $(R_{pB})_n$ | = resistencia nominal al aplastamiento sobre pasadores (N) (6.7.6.2.2) |
| $(R_{pB})_r$ | = resistencia mayorada al aplastamiento sobre pasadores (N) (6.7.6.2.2) |
| R_{pc} | = factor de plastificación del alma para el ala de compresión (A6.1.3) |
| R_{pt} | = factor de plastificación del alma para el ala de tracción (A6.1.4) |
| R_r | = resistencia mayorada de un bulón, conexión o material conectado (N) o (MPa) (6.13.2.2) |

| | |
|--------------|--|
| $(R_{sB})_n$ | = resistencia nominal al aplastamiento para el extremo recortado de los rigidizadores de apoyo (N) (6.10.11.2.3) |
| $(R_{sB})_r$ | = resistencia mayorada al aplastamiento para el extremo recortado de los rigidizadores de apoyo (N) (6.10.11.2.3) |
| R_u | = carga concentrada o reacción de apoyo mayorada (N) (D6.5.2) |
| r | = mínimo radio de giro de un elemento traccionado o comprimido (mm); radio de giro de un elemento armado respecto de un eje perpendicular a una placa perforada (mm); radio de giro de un rigidizador de alma longitudinal incluyendo un ancho de alma efectivo tomado respecto del eje neutro de la sección combinada (mm) (6.8.4) (6.9.4.3.2) (6.10.11.3.3) |
| r_n | = presión nominal de aplastamiento en los orificios de los bulones (MPa) (C6.13.2.9) |
| r_s | = radio de giro de un perfil o tubo de acero estructural respecto del plano de pandeo (mm) (6.9.4.1) (6.9.5.1) |
| r_t | = radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional (mm) (6.10.8.2.3) |
| r_y | = radio de giro de una sección de acero con respecto a un eje vertical en el plano del alma (mm) (CB6.2.4) |
| r_{yc} | = radio de giro del ala de compresión con respecto a un eje vertical en el plano del alma (mm) (C6.10.8.2.3) |
| S | = módulo resistente elástico de la sección (mm^3) (C6.12.2.2.1) |
| S_{LT} | = módulo resistente elástico de la sección compuesta a largo plazo (mm^3) (D6.2.2) |
| S_{NC} | = módulo resistente elástico de la sección no compuesta (mm^3) (D6.2.2) |
| S_s | = módulo resistente elástico de la sección de un rigidizador de ala transversal (mm^3) (C6.11.11.2) |
| S_{ST} | = módulo resistente elástico de la sección compuesta a corto plazo (mm^3) (D6.2.2) |
| S_x | = módulo resistente elástico de la sección hasta un ala inferior inclinada de un elemento de profundidad de alma variable (mm^3) (C6.10.1.4) |
| S_{xc} | = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm^3) (C6.8.2.3) |
| S_{xt} | = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} (mm^3) (C6.8.2.3) |
| S_y | = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje paralelo al alma (mm^3) (6.12.2.2.1) |
| s | = separación de dos bulones consecutivos en una cadena alternada en tresbolillo (mm); separación longitudinal de la armadura transversal en un perfil revestido de hormigón (mm); separación de los bulones en una línea individual o en un patrón en tresbolillo adyacente a un borde libre de una placa o perfil exterior (mm); separación vertical de los bulones en un empalme de alma (mm) (6.8.3) (6.12.3.1) (6.13.2.6.2) (C6.13.6.1.4b) |
| s_t | = máxima separación transversal entre conectores de corte en el ala de una sección tipo cajón compuesta (mm) (6.11.10) |
| T | = par torsor interno en una sección tipo cajón debido a las cargas mayoradas (N-mm); espesor del metal base de la parte de mayor espesor conectada mediante una unión soldada a filete indicado en la Tabla 6.13.3.4-1 (mm) (C6.11.1.1) (6.13.3.4) |
| T_n | = resistencia nominal de un bulón solicitado a tracción axial o a una combinación de tracción axial y corte (N) (6.13.2.2) |
| T_r | = resistencia mayorada de un bulón solicitado a tracción axial o a una combinación de tracción axial y corte (N) (6.13.2.2) |
| T_u | = fuerza de tracción en cada bulón debida a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II (N) (6.13.2.11) |
| t | = espesor de la placa o placas (mm); espesor del tubo o pared (mm); espesor del perfil o la placa exterior más |

| | |
|-----------|--|
| | delgada (mm); espesor del material conectado (mm); espesor de la parte conectada más delgada (mm) (C6.7.4.3) (6.12.2.2.3) (6.13.2.6.2) (6.13.2.9) (6.13.2.10.4) |
| t_b | = espesor del ala que transmite la fuerza concentrada en una conexión de pórtico un rígido (mm) (6.13.7.2) |
| t_c | = espesor del ala del elemento a rigidizar en una conexión de un pórtico rígido (mm) (6.13.7.2) |
| t_f | = espesor del ala (mm); espesor del ala de un conector de corte tipo canal (mm); espesor del ala que resiste una carga concentrada o reacción de apoyo (mm) (6.10.2.2) (6.10.10.4.3) (D6.5.3) |
| t_{fc} | = espesor del ala de compresión (mm) (6.10.1.10.2) |
| t_{ft} | = espesor del ala de tracción (mm) (C6.10.9.1) |
| t_p | = espesor de una placa cargada transversalmente (mm); espesor de un elemento rigidizador saliente (mm) (6.6.1.2.5) (6.10.11.1.2) |
| t_s | = espesor de un tablero de hormigón (mm); espesor de un rigidizador longitudinal de alma o de ala (mm); espesor de un rigidizador de nervadura de arco (mm) (6.10.1.10.2) (6.10.11.3.2) (6.14.4.2) |
| t_w | = espesor del alma o tubo (mm); espesor del alma de un conector de corte tipo canal (mm); espesor del alma a rigidizar en una conexión de un pórtico rígido (mm); espesor de alma de una nervadura de arco (mm) (6.9.4.2) (6.10.10.4.3) (6.13.7.2) (6.14.4.2) |
| U | = factor de reducción que considera el retraso del corte en las conexiones sujetas a una carga de tracción (6.8.2.1) |
| V | = fuerza de corte adicional para elementos armados con placas perforadas (N); fuerza de corte vertical mayorada en el diafragma interno de una sección tipo cajón en una pila interior provocada por flexión más torsión de Saint-Venant (N) (6.9.4.3.2) (C6.11.8.1.1) |
| V_{cr} | = resistencia al pandeo por corte (N) (6.10.3.3) |
| V_f | = rango de fuerzas de corte vertical bajo la combinación de cargas para Estado Límite de Fatiga (N) (6.10.10.1.2) |
| V_n | = resistencia nominal al corte (N) (6.10.9.1) |
| V_p | = fuerza de corte plástico (N) (6.10.9.2) |
| V_r | = resistencia al corte mayorada (N) (6.12.1.2.3) |
| V_{sr} | = rango de corte horizontal de fatiga por unidad de longitud (N/mm); suma vectorial del rango de corte horizontal de fatiga más el rango de corte por torsión de fatiga en el tablero de hormigón para el ala de una sección tipo cajón compuesta (N/mm) (6.10.10.1.2) (6.11.10) |
| V_u | = corte debido a las cargas mayoradas (N); corte vertical debido a las cargas mayoradas en un alma inclinada de una sección tipo cajón (N) (6.7.6.2.1) (6.11.9) |
| V_{ui} | = corte debido a las cargas mayoradas en un alma inclinada de una sección tipo cajón (N) (6.11.9) |
| V_{uw} | = corte de diseño para el alma en un punto de empalme (N) (6.13.6.1.4b) |
| w | = distancia entre centros de las alas superiores de una sección tipo cajón (mm); mayor valor entre el ancho del ala de una sección tipo cajón entre rigidizadores de ala longitudinales y la distancia entre un alma y el rigidizador de ala longitudinal más próximo (mm) (6.11.2.3) (6.11.8.2.3) |
| \bar{y} | = distancia desde el eje neutro plástico hasta la parte superior del elemento en el cual está ubicado el eje neutro plástico (mm) (D6.1) |
| Z | = módulo resistente plástico de la sección (mm ³) (6.12.2.3.1) |
| Z_r | = resistencia a la fatiga por corte de un conector de corte individual (N) (6.10.10.1.2) |
| Z_y | = módulo resistente plástico de la sección respecto del eje paralelo al alma (mm ³) (6.12.2.2.1) |

| | |
|---------------------|--|
| α | = factor que define la recta inclinada que representa la porción de vida finita de la resistencia al corte por fatiga de un conector de corte tipo perno individual; factor para el diseño de empalmes de alas generalmente igual a 1.0, excepto que se puede utilizar un valor menor igual a F_n/F_{yf} para alas en las cuales F_n es menor que F_{yf} (6.10.10.2) (6.13.6.1.4c) |
| β | = factor igual a dos veces el área del alma en base a D_n dividida por A_{fn} que se utiliza para calcular el factor de hibridez; factor que define la relación aproximada entre D_p y $D_t/7.5$ para la cual una sección compuesta en flexión positiva llega a M_p (6.10.1.10.1) (C6.10.7.1.2) |
| η | = modificador de las cargas relacionado con la ductilidad, redundancia e importancia operativa (C6.6.1.2.2) |
| γ | = factor de carga especificado en la Tabla 3.4.1-1; relación entre A_f y A_p para el diseño de placas de relleno (6.6.1.2.2) (6.13.6.1.5) |
| Δ | = factor de reducción para la máxima tensión en el ala de una sección tipo cajón (6.11.3.2) |
| (Δf) | = rango de tensiones de la sobrecarga debida al paso de la carga de fatiga (MPa) (6.6.1.2.2) |
| $(\Delta F)_n^c$ | = resistencia nominal a la fatiga para la Categoría C para diseño a fatiga (MPa) (6.6.1.2.5) |
| $(\Delta F)_n$ | = resistencia nominal a la fatiga (MPa) (6.6.1.2.2) (6.6.1.2.5) |
| (ΔF_{TH}) | = umbral de fatiga para amplitud constante (MPa) (6.6.1.2.5) |
| λ | = factor de esbeltez de columna normalizado (6.9.4.1) |
| λ_f | = relación de esbeltez para el ala de compresión; relación de esbeltez para el ala (6.10.8.2.2) (6.12.2.2.1) |
| λ_{pf} | = relación de esbeltez límite para un ala compacta (6.10.8.2.2) |
| $\lambda_{pw(Dc)}$ | = relación de esbeltez límite para un alma compacta correspondiente a $2D_c/t_w$ (A6.2.2) |
| $\lambda_{pw(Dcp)}$ | = relación de esbeltez límite para un alma compacta correspondiente a $2D_{cp}/t_w$ (A6.2.1) |
| λ_{rf} | = relación de esbeltez límite para un ala no compacta (6.10.8.2.2) |
| λ_{rw} | = relación de esbeltez límite para un alma no compacta (6.10.1.10.2) |
| λ_w | = relación de esbeltez para el alma en base al momento elástico (A6.2.2) |
| ψ | = constante que se utiliza para determinar el momento de inercia requerido de los rigidizadores longitudinales para las alas de las secciones tipo cajón (6.11.11.2) |
| ρ | = factor igual al menor valor entre F_{yw}/f_n y 1.0 que se utiliza para calcular el factor de hibridez (6.10.1.10.1) |
| θ | = ángulo de inclinación del ala inferior de un elemento de profundidad de alma variable (°); ángulo de inclinación de la placa de alma de una sección tipo cajón respecto de la vertical (°) (C6.10.1.4) (6.11.9) |
| θ_p | = rotación plástica en la sección en una pila interior (radianes) (B6.6.2) |
| θ_{RL} | = rotación plástica para la cual el momento en la sección en una pila interior nominalmente comienza a disminuir a medida que aumenta θ_p (radianes) (6.10.7.1.2) |
| ϕ | = factor de resistencia; factor de resistencia durante el hincado de pilotes; factor de resistencia para tracción del hormigón especificado en el Artículo 5.5.4.2.1 (6.5.4.2) (6.10.1.7) |
| ϕ_b | = factor de resistencia para aplastamiento (6.5.4.2) |
| ϕ_{bb} | = factor de resistencia para aplastamiento de bulones que apoyan sobre material (6.5.4.2) |
| ϕ_{bs} | = factor de resistencia para bloque de corte (6.5.4.2) |
| ϕ_c | = factor de resistencia para compresión axial (6.5.4.2) |
| ϕ_{el} | = factor de resistencia para corte sobre el área efectiva del metal de soldadura en soldaduras de penetración total; factor de resistencia para tensión normal al área efectiva del metal de soldadura en las soldaduras de penetración parcial (6.5.4.2) |

| | |
|-------------|--|
| ϕ_{e2} | = factor de resistencia para corte paralelo al eje del metal de soldadura en las soldaduras de penetración parcial; factor de resistencia para corte en la garganta del metal de soldadura en las soldaduras de filete (6.5.4.2) |
| ϕ_f | = factor de resistencia para flexión (6.5.4.2) |
| ϕ_s | = factor de resistencia para corte en bulones (6.5.4.2) |
| ϕ_{sc} | = factor de resistencia para conectores de corte (6.5.4.2) |
| ϕ_{sd} | = factor de resistencia para adaptación plástica (6.5.4.2) |
| ϕ_t | = factor de resistencia para tracción en bulones (6.5.4.2) |
| ϕ_u | = factor de resistencia para fractura en la sección neta de los elementos traccionados (6.5.4.2) |
| ϕ_v | = factor de resistencia para corte (6.5.4.2) |
| ϕ_w | = factor de resistencia abolladura del alma (6.5.4.2) |
| ϕ_y | = factor de resistencia para fluencia en la sección bruta de los elementos traccionados (6.5.4.2) |

6.4 MATERIALES

6.4.1 Aceros estructurales

Los aceros estructurales deberán satisfacer los requisitos especificados en la Tabla 1, y el diseño se deberá realizar en base a las propiedades mínimas indicadas.

Se asumirá que el módulo de elasticidad y el coeficiente de expansión térmica de todos los aceros estructurales son iguales a 200 000 MPa y 11.7×10^{-6} mm/mm/°C, respectivamente.

C6.4.1

En estas especificaciones el término “resistencia a la fluencia” se utiliza como término genérico para designar ya sea el punto de fluencia mínimo especificado o la resistencia mínima a la fluencia especificada.

La principal, y en la mayoría de los casos única, diferencia entre los requisitos de AASHTO y ASTM es que las normas AASHTO incluyen requisitos obligatorios sobre tenacidad a la entalla y soldabilidad. Los aceros que satisfacen los requisitos de AASHTO están precalificados para ser utilizados en puentes soldados.

La resistencia a la fluencia en la dirección paralela a la dirección de laminado es de interés fundamental en el diseño de la mayoría de las estructuras. En los puentes soldados la tenacidad a la entalla es igualmente importante. Otras propiedades mecánicas y físicas del acero laminado tales como su anisotropía, ductilidad, formabilidad y resistencia a la corrosión también pueden ser importantes para asegurar que la estructura se comporte adecuadamente.

Ninguna especificación puede anticipar todas las aplicaciones únicas o particularmente exigentes que pueden surgir en la realidad. Si corresponde, se debería consultar la literatura sobre propiedades específicas y el material suplementario o requisitos apropiados indicados en las Especificaciones AASHTO y ASTM y en el Código para Soldadura de Puentes AASHTO/AWS D1.5M/D1.5.

El acero AASHTO M 270M, Grado HPS 485W ha reemplazado al acero AASHTO M 270M, Grado 485W, en la Tabla 1. La intención de este cambio es alentar el uso del acero HPS, que presenta propiedades mejoradas, por encima de otros aceros convencionales para puentes. El acero AASHTO M 270 M, Grado 485W, aún se puede

conseguir, pero sólo se debería utilizar con la autorización expresa del Propietario. Las longitudes disponibles de acero AASHTO M 270M, Grado HPS 485W, dependen de cómo se procesan las placas; las mayores longitudes se producen como placas laminadas sin tratamiento adicional.

El acero AASHTO M 270M, Grado 250, (ASTM A 709M, Grado 250) se puede utilizar en espesores mayores que 100 mm para aplicaciones no estructurales o componentes de elementos de apoyo.

Está permitido utilizar perfiles estructurales de acero aleado templado y revenido y tubos sin costura cuya máxima resistencia especificada a la tracción no sea mayor que 965 MPa en el caso de los perfiles estructurales o 1000 MPa en el caso de los tubos sin costura, siempre que:

- El material satisfaga todos los demás requisitos mecánicos y químicos correspondientes ya sea a ASTM A 709M, Grados 690 o 690W, y
- El diseño esté basado en las propiedades mínimas especificadas para los aceros ASTM A 709M, Grados 690 y 690W.

Los tubos estructurales deberán ser tubos soldados conformados en frío o tubos sin costura de acuerdo con la norma ASTM A 500, Grado B, o bien tubos soldados conformados en caliente o tubos sin costura que satisfagan ASTM A 501.

Las limitaciones referentes al espesor de los perfiles y conjuntos laminados deberán satisfacer AASHTO M 160M (ASTM A 6M).

Tabla 6.4.1-1 Propiedades mecánicas mínimas del acero estructural según su forma, resistencia y espesor

| Denominación AASHTO | M 270M Grado 250 | M 270M Grado 345 | M 270M Grado 345S | M 270M Grado 345W | M 270M Grado HPS 345W | M 270M Grado HPS 485W | M 270M Grados 690/690W | |
|--|--|---------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Denominación ASTM equivalente | A 709M Grado 250 | A 709M Grado 345 | A 709M Grado 345S | A 709M Grado 345W | A 709M Grado HPS 345W | A 709M Grado HPS 485W | A 709M Grados 690/690W | |
| Espesor de las placas, mm. | Hasta 100 incl. | Hasta 100 incl. | No aplicable | Hasta 100 incl. | Hasta 100 incl. | Hasta 100 incl. | Hasta 65 incl. | Más de 65 hasta 100 incl. |
| Perfiles | Todos los grupos Todos los grupos | Todos los grupos | Todos los grupos | Todos los grupos | No aplicable | No aplicable | No aplicable | No aplicable |
| Mínima resistencia a la tracción, F_u , MPa | 400 | 450 | 450 | 485 | 485 | 585 | 760 | 690 |
| Mínimo punto de fluencia especificado o mínima resistencia a la fluencia especificada, F_y , MPa | 250 | 345 | 345 | 345 | 345 | 485 | 690 | 620 |

6.4.2 Pasadores, rodillos y balancines

El acero para los pasadores, rodillos y balancines de expansión deberá satisfacer los requisitos de la Tabla 1, la Tabla 6.4.1-1 o el Artículo 6.4.7.

Los rodillos de expansión no deberán tener menos de 100 mm de diámetro.

Tabla 6.4.2-1 Propiedades mecánicas mínimas de los pasadores, rodillos y balancines según su tamaño y resistencia

| Denominación AASHTO con limitación de tamaño | M 169 diám. 100 mm o menos | M 102 diám. hasta 500 mm | M 102 diám. hasta 500 mm | M 102 diám. hasta 250 mm | M 102 diám. hasta 500 mm |
|---|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Denominación ASTM Grado o clase | A 108 Grados 1016 a 1030 inclusive | A 668 Clase C | A 668 Clase D | A 668 Clase F | A 668 Clase G |
| Punto de fluencia mínimo especificado, F_y , MPa | 250 | 230 | 260 | 345 | 345 |

6.4.3 Bulones, tuercas y arandelas

6.4.3.1 Bulones

Los bulones deberán satisfacer una de las siguientes normas:

- ASTM A 307, Especificación Estándar para Bulones y Pernos de Acero al Carbono, Resistencia a la Tracción 420 MPa
- AASHTO M 164M (ASTM A 325M), Especificación Estándar para Bulones de Alta Resistencia para Uniones Estructurales de Acero con una resistencia mínima a la tracción requerida de 830 MPa, o bien
- AASHTO M 235M (ASTM A 490M), Especificación Estándar para Bulones de Alta Resistencia, Clases 10.9 y 10.9.3 para Uniones Estructurales de Acero.

Los bulones Tipo 1 sólo se deberían utilizar con aceros que no sean aceros autoprotegidos. Con los aceros autoprotegidos se deberían utilizar bulones Tipo 3 de acuerdo ya sea con AASHTO M 164 M (ASTM A 325M) o bien con AASHTO M 253M (ASTM A 490M). Los bulones AASHTO M 164M (ASTM A 325M) Tipo 1 pueden ser galvanizados por inmersión en caliente de acuerdo con la norma AASHTO M232 (ASTM A 153), Clase C, o bien galvanizados mecánicamente de acuerdo con la norma AASHTO M 298 (ASTM B 695), Clase 345 (50), cuando así lo apruebe el Ingeniero. Los bulones galvanizados deberán ser ensayados a tracción luego del galvanizado, tal como lo requiere la norma AASHTO M 164M (ASTM A 325M).

Los bulones conforme a la norma AASHTO M 253M

C6.4.3.1

La norma ASTM para bulones A 307 abarca dos grados de sujetadores. No hay una norma AASHTO que se corresponda con dicha norma ASTM. De acuerdo con estas especificaciones se puede utilizar cualquiera de los dos grados; sin embargo, la intención es que el Grado B se utilice para abulonar alas de tubos, mientras que tradicionalmente para aplicaciones estructurales se utiliza el Grado A.

(ASTM A 490M) no deberán ser galvanizados.

Las arandelas, tuercas y bulones de un mismo conjunto deberán ser galvanizados mediante el mismo proceso. Las tuercas se deberían roscar sólo hasta el mínimo requerido para el conjunto del sujetador y además se deberán lubricar con un lubricante que contenga un tinte visible.

6.4.3.2 Tuercas

Con las excepciones notadas a continuación, las tuercas para los bulones AASHTO M 164M (ASTM A 325M) deberán satisfacer la Especificación Estándar para Tuercas de Acero al Carbono y Aleado, AASHTO M 291M (ASTM A 563M), Clases 8S, 8S3, 10S o 10S3.

Las tuercas para los bulones AASHTO M 253M (ASTM 490M) deberán satisfacer los requisitos de AASHTO M 291M (ASTM 563M), Clases 10S o 10S3.

Las tuercas que han de ser galvanizadas deberán ser Clase 10S con tratamiento térmico. Se aplicarán los requisitos del Artículo 6.4.3.1.

Las tuercas simples deberán tener una dureza mínima de 89 HRB.

Las tuercas que se han de utilizar con bulones AASHTO M 164M (ASTM A 325M), Tipo 3 deberán ser Clase 8S3 o 10S3. Las tuercas que se han de utilizar con bulones AASHTO M 253M (ASTM A 490M) Tipo 3 deberán ser Clase 10S3.

6.4.3.3 Arandelas

Las arandelas deberán satisfacer la Especificación Estándar para Arandelas de Acero Endurecido, AASHTO M 293M (ASTM F 436M).

Los requisitos del Artículo 6.4.3.1 también se aplicarán a las arandelas galvanizadas.

6.4.3.4 Sujetadores alternativos

Siempre que el Ingeniero lo apruebe, se podrán utilizar otros tipos de sujetadores o conjuntos de sujetadores no especificados en las secciones precedentes, como por ejemplo aquellos que satisfacen los requisitos de la especificación ASTM F 1852, siempre que:

- Satisfagan los requisitos sobre materiales, fabricación y composición química contenidos en AASHTO M 164M (ASTM A 325M) o AASHTO M 253M (ASTM A 490M),
- Al realizar ensayos a escala real satisfagan los requisitos sobre propiedades mecánicas contenidos en la misma especificación, y
- El diámetro del cuerpo y las áreas de apoyo debajo de la cabeza y la tuerca, o su equivalente, no deberá ser

El propósito del tinte es permitir que la inspección visual del lubricante en el momento de la instalación en obra.

En el momento de su entrega e instalación los bulones negros deben sentirse aceitosos al tacto .

C6.4.3.2

Todas las tuercas galvanizadas se deberán lubricar con un lubricante que contenga un tinte visible.

C6.4.3.3

Las *Especificaciones AASHTO para la Construcción de Puentes mediante LRFD (1998)* contiene los requisitos aplicables a la instalación de las arandelas.

C6.4.3.4

En la actualidad no hay una versión equivalente de la especificación ASTM F 1852 en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Es por este motivo que en la presente se hace referencia a la versión de la especificación en unidades del Sistema Inglés.

menor que los correspondientes a un bulón y tuerca de las mismas dimensiones nominales indicadas en los Artículos 6.4.3.1 y 6.4.3.2.

Las restantes dimensiones de estos sujetadores alternativos podrán diferir de las correspondientes a los bulones, tuercas y arandelas especificadas en los Artículos 6.4.3.1 a 6.4.3.3.

6.4.3.5 Dispositivos indicadores de la carga

En combinación con los bulones, tuercas y arandelas se podrán utilizar dispositivos indicadores de la carga que satisfagan los requisitos de la Especificación Estándar para Indicadores de Tensión Directa Tipo Arandela Compresible para Uso con Sujetadores Estructurales, ASTM F 959M.

Si el Ingeniero lo aprueba, se podrán utilizar indicadores de tensión directa alternativos.

6.4.4 Conectores de corte tipo perno

Los conectores de corte tipo perno se deberán fabricar de barras estiradas en frío, Grados 1015, 1018 o 1020, ya sea semicalmado o calmado, conforme a la Especificación Estándar AASHTO M 169 (ASTM A 108) – Barras de Acero al Carbono, Acabadas en Frío, Calidad Estándar, y su resistencia a la fluencia y a la tracción deberán ser como mínimo iguales a 345 MPa y 415 MPa, respectivamente. Si se utilizan topes para retener el fundente, dichos topes deberán ser de un acero de bajo contenido de carbono apto para soldadura y deberán satisfacer la especificación ASTM A 109M – Especificación Estándar para Flejes de Acero al Carbono Laminados en Frío.

6.4.5 Metal de soldadura

El metal de soldadura deberá satisfacer los requisitos del Código para Soldadura de Puentes AASHTO/AWS D1.5M/D1.5.

6.4.6 Metal fundido

6.4.6.1 Fundiciones de acero y hierro dúctil

El acero fundido deberá cumplir con una de las siguientes especificaciones:

C6.4.3.5

Los requisitos aplicables a la instalación de los dispositivos indicadores de la carga se indican en *Especificaciones AASHTO para la Construcción de Puentes mediante LRFD (1998)*.

C6.4.4

Las propiedades físicas, métodos de ensayo y certificación de los conectores de corte tipo perno se indican en las *Especificaciones AASHTO para la Construcción de Puentes mediante LRFD (1998)*.

C6.4.5

Los sistemas de denominación de la AWS no son consistentes. Por ejemplo, hay diferencias entre el sistema que se utiliza para designar los electrodos para soldadura por arco manual con electrodos revestidos y el sistema que se utiliza para designar las soldaduras por arco sumergido. Por lo tanto, al especificar metal de soldadura y/o fundente de acuerdo con sus denominaciones AWS se debería revisar la especificación aplicable para verificar que se haya comprendido cabalmente la designación a la cual se hace referencia.

- AASHTO M 192M – Especificación Estándar para Fundiciones de Acero para Puentes Carreteros, Clase 485, a menos que se especifique lo contrario;
- AASHTO M 103M (ASTM A 27M) – Especificación Estándar para Fundiciones de Acero al Carbono para Aplicaciones Generales, Grado 485-250, a menos que se especifique lo contrario;
- AASHTO M 163M (ASTM A 743M) – Especificación Estándar para Fundiciones Resistentes a la Corrosión de Aleaciones a base de Hierro-Cromo, Hierro-Cromo-Níquel y Níquel para aplicaciones Generales, Grado CA15, a menos que se especifique lo contrario.

Las fundiciones de hierro dúctil deberán satisfacer la Especificación Estándar para Fundiciones de Hierro Dúctil, ASTM A 536, Grado 414-276-18, a menos que se especifique lo contrario.

6.4.6.2 Fundiciones maleables

Las fundiciones maleables deberán satisfacer la Especificación Estándar para Fundiciones Ferríticas de Hierro Maleable, ASTM A 47M, Grado 24118. La mínima resistencia a la fluencia especificada no deberá ser menor que 241 MPa.

6.4.6.3 Hierro fundido

El hierro fundido deberá satisfacer la Especificación Estándar para Fundiciones de Hierro Gris, AASHTO M 105 (ASTM A 48M), Clase 30.

6.4.7 Acero inoxidable

El acero inoxidable podrá satisfacer los requisitos de una de las siguientes especificaciones:

- ASTM A 176 – Especificación Estándar para Placas, Chapas y Flejes de Acero Inoxidable y al Cromo Resistente al Calor;
 - ASTM A 240M – Especificación Estándar para Placas, Chapas y Flejes de Acero Inoxidable al Cromo y al Cromo-Níquel Resistente al Calor para Recipientes a Presión;
 - ASTM A 276 – Especificación Estándar para Barras y Perfiles de Acero Inoxidable Resistente al Calor; o bien
 - ASTM A 666 – Especificación Estándar para Chapas, Flejes y Barras Planas de Acero Inoxidable
-

Austenítico para Aplicaciones Estructurales.

Se podrá utilizar un acero inoxidable que no satisfaga las especificaciones arriba listadas, siempre que dicho acero satisfaga los requisitos químicos y mecánicos indicados en una de las especificaciones arriba listadas o en otra norma publicada que establezca sus propiedades y aptitud y que sea sometido a análisis, ensayos y otros controles a tal punto y de la manera prescrita por una de las especificaciones listadas.

6.4.8 Cables

6.4.8.1 Alambre brillante

El alambre brillante deberá satisfacer la Especificación Estándar ASTM A 510M – Requisitos Generales para Varillas de Alambre y Alambre Redondo Basto de Acero al Carbono.

6.4.8.2 Alambre galvanizado

El alambre galvanizado deberá satisfacer la Especificación ASTM A 641M – Especificación Estándar para Alambre de Acero al Carbono con Recubrimiento de Zinc (Galvanizado).

6.4.8.3 Alambre con recubrimiento epoxi

El alambre con recubrimiento epoxi deberá satisfacer la Especificación ASTM A 99 – Especificación Estándar para Alambre de Acero con Recubrimiento Epoxi.

6.4.8.4 Cables para puentes

Los cables para puentes deberán satisfacer las Especificaciones ASTM A 586 – Especificación Estándar para Torones Estructurales de Alambres de Acero Paralelos y Enrollados Helicoidalmente con Recubrimiento de Zinc, o ASTM A 603 – Especificación Estándar para Cables Estructurales de Acero con Recubrimiento de Zinc.

6.5 ESTADOS LÍMITES

6.5.1 Disposiciones Generales

El comportamiento estructural de los componentes de acero o de acero combinado con otros materiales se deberá investigar para cada etapa que pueda resultar crítica durante la construcción, manipulación, transporte y montaje, así como durante la vida de servicio de la estructura de la cual forman parte.

Los elementos estructurales se deberán dimensionar de

manera que satisfagan los requisitos correspondientes a los estados límites de resistencia, evento extremo, servicio y fatiga.

6.5.2 Estado límite de servicio

Se aplicarán los requisitos del Artículo 2.5.2.6 según corresponda.
Los elementos que trabajan a flexión se deberán investigar para el Estado Límite de Servicio como se especifica en las Secciones 6.10 y 6.11.

6.5.3 Estado límite de fatiga y fractura

Los componentes y detalles se deberán investigar para el Estado Límite de Fatiga como se especifica en el Artículo 6.6.
Se deberán aplicar la combinación de cargas de fatiga especificada en la Tabla 3.4.1-1 y la sobrecarga de fatiga especificada en el Artículo 3.6.1.4.
Los elementos que trabajan a flexión se deberán investigar para el Estado Límite de Fatiga y Fractura como se especifica en las Secciones 6.10 y 6.11.
Los bulones sujetos a fatiga por tracción deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.13.2.10.3.
Los requisitos de tenacidad a la fractura deberán ser como se especifica en el Artículo 6.6.2.

6.5.4 Estado límite de resistencia

6.5.4.1 Disposiciones generales

La resistencia y la estabilidad se deberán considerar usando las combinaciones de cargas aplicables especificadas en la Tabla 3.4.1-1.

6.5.4.2 Factores de resistencia

Los factores de resistencia, ϕ , para el Estado Límite de Resistencia se deberán tomar de la siguiente manera:

- Para flexión $\phi_f = 1.00$
- Para corte $\phi_v = 1.00$
- Para compresión axial, elementos sólo de acero $\phi_c = 0.90$
- Para compresión axial, elementos compuestos $\phi_c = 0.90$
- Para tracción, fractura en la sección neta $\phi_u = 0.80$
- Para tracción, fluencia en la sección bruta $\phi_y = 0.95$

C6.5.2

La intención de los requisitos para Estado Límite de Servicio especificados en las Secciones 6.10 y 6.11 para elementos que trabajan a flexión es fundamentalmente evitar deformaciones permanentes objetables que podrían ocurrir como resultado de la fluencia localizada, ya que si las cargas de tráfico anticipadas son importantes estas deformaciones podrían afectar la transitabilidad del puente.

C6.5.4.2

Factor de resistencia ϕ para el metal de base según corresponda a la resistencia considerada.

- Para aplastamiento sobre pasadores en orificios escariados o perforados o sobre superficies cepilladas $\phi_b = 1.00$
- Para bulones que apoyan sobre material $\phi_{bb} = 0.80$
- Para conectores de corte $\phi_{sc} = 0.85$
- Para bulones A 325M y A 490M en tracción $\phi_t = 0.80$
- Para bulones A 307 en tracción $\phi_t = 0.80$
- Para bulones A 307 en corte $\phi_s = 0.65$
- Para bulones A 325M y A 490M en corte $\phi_s = 0.80$
- Para bloque de corte $\phi_{bs} = 0.80$
- Para abolladura del alma $\phi_w = 0.80$
- Para metal de soldadura en las soldaduras de penetración total:
 - corte sobre área efectiva $\phi_{eI} = 0.85$
 - tracción o compresión normal al área efectiva:
igual que el metal base
 - tracción o compresión paralela al eje de la soldadura:
igual que el metal base
- Para metal de soldadura en las soldaduras de penetración parcial:
 - corte paralelo al eje de la soldadura $\phi_{e2} = 0.80$
 - tracción o compresión paralela al eje de la soldadura:
igual que el metal base
 - compresión normal al área efectiva:
igual que el metal base
 - tracción normal al área efectiva: $\phi_{eI} = 0.80$
- Para metal de soldadura en soldaduras de filete:
 - tracción o compresión paralela al eje de la soldadura:
igual que el metal base
 - corte en la garganta de metal de soldadura
 $\phi_{e2} = 0.80$
- Para resistencia durante el hincado de pilotes $\phi = 1.00$
- Para resistencia axial de pilotes en compresión y sujetos a daños provocados por condiciones de hincado severas cuando en el pilote es necesario utilizar una punta de perforación:
 - pilotes H $\phi_c = 0.50$
 - pilotes de sección circular hueca $\phi_c = 0.60$
- Para resistencia axial de pilotes en compresión cuando las condiciones de hincado son buenas y no es necesario utilizar en el pilote una punta de perforación:

En el Artículo 6.15.2 se describe el fundamento en el que se basan los factores de resistencia para pilotes de acero hincados. El Artículo 10.7.1.16 contiene limitaciones adicionales sobre la resistencia utilizable durante el hincado.

- pilotes H $\phi_c = 0.60$
- pilotes de sección circular hueca $\phi_c = 0.70$
- Para resistencia combinada a carga axial y flexión en pilotes no dañados:
 - resistencia axial para pilotes H $\phi_c = 0.70$
 - resistencia axial para pilotes de sección circular hueca $\phi_c = 0.80$
 - resistencia a flexión $\phi_f = 1.00$

Los valores de ϕ_c y ϕ_f indicados para la resistencia combinada a carga axial y flexión se utilizan en las ecuaciones de interacción del Artículo 6.9.2.2.

6.5.5 Estado límite correspondiente a evento extremo

Se deberán investigar todas las combinaciones de cargas correspondientes a evento extremo especificadas en la Tabla 3.4.1-1.

A excepción de los factores de resistencia para los bulones, todos los factores de resistencia para el Estado Límite correspondiente a Evento Extremo se deberán tomar iguales a 1.0.

Se podrá asumir que las uniones abulonadas que no están protegidas mediante un diseño para capacidad o mediante fusibles estructurales se comportarán como conexiones de tipo portante en el Estado Límite correspondiente a Evento Extremo, y se deberán aplicar los factores de resistencia para bulones indicados en el Artículo 6.5.4.2.

6.6 CONSIDERACIONES SOBRE EL ESTADO LÍMITE DE FATIGA Y FRACTURA

6.6.1 Fatiga

6.6.1.1 Disposiciones generales

La fatiga se deberá clasificar como fatiga inducida por las cargas o por las distorsiones.

C6.6.1.1

Los requisitos de las *Especificaciones Estándares AASHTO para Puentes Carreteros (2002)* que tratan explícitamente la fatiga se ocupan solamente de la fatiga inducida por las cargas.

6.6.1.2 Fatiga inducida por las cargas

6.6.1.2.1 Aplicación

C6.6.1.2.1

La solicitud a considerar para diseñar a fatiga los detalles de un puente de acero será el rango de tensiones debido a la sobrecarga viva. Para los elementos que trabajan a flexión que están provistos de conectores de corte en toda su longitud y que tienen un tablero de hormigón cuya armadura satisface los requisitos del Artículo 6.10.1.7, el rango de tensiones debido a la sobrecarga viva se podrá calcular usando la sección compuesta a corto plazo suponiendo que el tablero de hormigón es efectivo tanto para flexión positiva como para flexión negativa.

Al investigar la fatiga no se deberán considerar las tensiones residuales.

Estos requisitos se aplican sólo a los detalles sujetos a una tensión aplicada neta de tracción. En las regiones en las cuales las cargas permanentes no mayoradas producen compresión, la fatiga se deberá considerar solamente si la tensión de compresión es menor que dos veces la máxima tensión de tracción debida a la sobrecarga viva que resulte de la combinación de cargas especificada en la Tabla 3.4.1-1 para fatiga.

6.6.1.2.2 Criterios de diseño

Por consideraciones relacionadas con la fatiga inducida por las cargas, cada detalle deberá satisfacer lo siguiente:

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n \quad (6.6.1.2.2-1)$$

donde:

γ = factor de carga especificado en la Tabla 3.4.1-1 para la combinación de cargas correspondiente a fatiga

(Δf) = sollicitación, rango de tensiones de la sobrecarga

Bajo niveles de carga de servicio el hormigón puede contribuir una resistencia a la tracción significativa. Reconocer este efecto beneficia considerablemente el cálculo de los rangos de tensiones de fatiga en las alas superiores en las zonas de inversión de tensiones y en las regiones en flexión negativa. Utilizando conectores de corte para asegurar la acción compuesta en estas regiones, combinados con el 1 por ciento de armadura longitudinal requerido cuando la tensión de tracción longitudinal en el tablero de hormigón es mayor que el módulo de rotura mayorado del hormigón, es posible controlar la longitud y el ancho de las fisuras de manera que no se produzcan fisuras que abarquen toda la profundidad. Cuando ocurre una fisura la tensión en la armadura longitudinal aumenta hasta que la fisura se detiene. Finalmente el hormigón fisurado y la armadura alcanzan el equilibrio. Por lo tanto, en cualquier sección del tablero de hormigón puede haber una pequeña cantidad de fisuras alternadas. La armadura longitudinal correctamente colocada evitará que dichas fisuras se unan y crezcan en forma combinada.

Se ha demostrado que para un detalle de acero soldado el nivel de la tensión total aplicada es insignificante. Las tensiones residuales debidas a la soldadura se incluyen implícitamente especificando el rango de tensiones como el único parámetro de tensión determinante para el diseño a fatiga. Este mismo concepto de considerar solamente un rango de tensiones se ha aplicado para el caso de los detalles laminados, abulonados y remachados en los cuales los campos de tensiones residuales existentes son muy diferentes. Su aplicación al caso de los detalles no soldados es conservadora.

La tensión por la sobrecarga debida al paso de la carga de fatiga es aproximadamente igual a la mitad de la correspondiente al camión más pesado que se anticipa cruzará el puente en un período de 75 años.

C6.6.1.2.2

La Ecuación 1 se puede desarrollar describiendo la Ecuación 1.3.2.1-1 en términos de la carga de fatiga y parámetros de resistencia:

$$\eta\gamma(\Delta f) \leq \phi(\Delta F)_n \quad (C6.6.1.2.2-1)$$

pero para el Estado Límite de Fatiga,

$$\eta = 1.0$$

$$\phi = 1.0$$

debido al paso de la carga de fatiga como se especifica en el Artículo 3.6.1.4 (MPa)

$(\Delta F)_n$ = resistencia nominal a la fatiga como se especifica en el Artículo 6.6.1.2.5 (MPa)

6.6.1.2.3 Categorías para diseño a fatiga

Los componentes y detalles cuya resistencia a la fatiga sea menor o igual que la correspondiente a la Categoría C se deberán diseñar de manera que satisfagan los requisitos de sus respectivas categorías para diseño a fatiga, las cuales se resumen en las Tablas 1 y 2 y se ilustran en la Figura 1.

C6.6.1.2.3

Los componentes y detalles susceptibles de sufrir fisuración por fatiga inducida por las cargas se han agrupado en ocho categorías de acuerdo con su resistencia a la fatiga.

La experiencia indica que en el proceso de diseño las consideraciones relacionadas con la fatiga para detalles pertenecientes a las Categorías A a B' rara vez resultan determinantes. Los componentes y detalles cuya resistencia a la fatiga es mayor que la correspondiente a la Categoría C se han incluido en las Tablas 1 y 2 simplemente con el objeto de presentar las tablas completas. Sin embargo, en casos de diseño especiales puede que sea necesario investigar detalles con resistencia a la fatiga mayor que la correspondiente a la Categoría C.

En la Tabla 1 se ha eliminado la Categoría F correspondiente a rango admisible de tensiones de corte sobre la garganta de una soldadura de filete, y se la ha reemplazado por la Categoría E. La Categoría F no estaba suficientemente bien definida. Aplicar la Categoría E en lugar de la Categoría F es una práctica conservadora. Siempre que las soldaduras de filete estén correctamente dimensionadas en base a las consideraciones de resistencia, la Categoría F no debería ser determinante.

En la Tabla 1, "Cargada longitudinalmente" significa que la dirección de la tensión aplicada es paralela al eje longitudinal de la soldadura. "Cargada transversalmente" significa que la dirección de la tensión aplicada es perpendicular al eje longitudinal de la soldadura.

En el trabajo de Wattar et al. (1985) se discuten diferentes investigaciones sobre cubrejuntas abulonados en los extremos.

La Tabla 2 contiene detalles especiales para placas ortótropas. Estos detalles requieren una cuidadosa consideración no sólo de los requisitos de la especificación sino también de los lineamientos de aplicación contenidos en el comentario.

- Empalmes en placas de tablero soldados en obra, Casos (1), (2) (3) – Las especificaciones actuales distinguen entre los empalmes longitudinales y transversales de las placas de tablero y tratan a los empalmes transversales de forma más conservadora. Sin embargo, no parece haber ningún fundamento válido que justifique este tratamiento diferencial; de hecho, bajo los efectos de las cargas de rueda localizadas, es posible que los empalmes

longitudinales en las placas de tablero estén sujetos a tensiones más elevadas. Por lo tanto, sólo debería ser determinante el rango de tensiones de fatiga. Una de las desventajas de los empalmes realizados en obra en los cuales no se retiran las barras de respaldo es la posible falta de alineación vertical y la susceptibilidad a la corrosión. Puede ser aceptable utilizar soldaduras de puntos intermitentes dentro de la ranura, ya que en definitiva las soldaduras de puntos se funden con el material de la soldadura en ranura. Las mismas consideraciones se aplican a los empalmes soldados en nervios cerrados.

- Empalmes abulonados en los nervios o el tablero, Caso (4) – No se pueden utilizar empalmes abulonados en un tablero cuando se han de colocar revestimientos superficiales de poco espesor. Sin embargo, en Estados Unidos es habitual el uso de empalmes abulonados en los nervios (los cuales requieren “ventanas para abulonado” pero tienen un comportamiento a fatiga favorable) combinados con empalmes soldados en el tablero.
- Empalmes en el tablero y los nervios soldados en el taller – El Caso (6) corresponde al requisito actual. El Caso (5) permite una clasificación más favorable para las soldaduras amolados.
- Empalmes tipo “ventana” en los nervios – El Caso (7) es el método preferido por los diseñadores para realizar empalmes soldados en los nervios cerrados, ya que ofrecen la ventaja de ser fácilmente ajustables en obra. De acuerdo con investigaciones de la ECSC, una gran luz para la soldadura mejora la resistencia a la fatiga. Una desventaja de este tipo de empalmes es la menor calidad y resistencia reducida a la fatiga de la soldadura manual que se debe realizar entre el inserto del nervio y la placa de tablero, y la sensibilidad a la fatiga de la unión entre la soldadura realizada en el taller y la soldadura realizada en obra.
- Nervios en las intersecciones con las vigas de tablero – Se distingue entre las paredes de los nervios sujetos exclusivamente a tensiones axiales, es decir el Caso (8), nervios cerrados con diafragmas internos o nervios abiertos, y las paredes de los nervios sujetos a flexión adicional fuera del plano, es decir Caso (9), nervios cerrados sin diafragmas internos, donde la flexión fuera del plano provocada por la compleja interacción entre la pared del nervio cerrado y el “diente” del alma de la viga de tablero entre los nervios contribuye tensiones de flexión adicionales en la pared del nervio que para calcular el rango de tensiones determinante se deberían sumar a las tensiones axiales. El cálculo de las fuerzas de

interacción y la flexión adicional en las paredes del nervio es extremadamente complejo debido a la gran cantidad de parámetros geométricos que involucra y sólo se puede lograr mediante un método de análisis por elementos finitos. Obviamente muchas veces este tipo de análisis no constituye una opción de diseño práctica, y se anticipa que los diseñadores elegirán el Caso (8) con diagrama interior, en cuyo caso no hay flexión en el plano del “diente” de la viga de tablero y tampoco ninguna tensión de interacción asociada que provoque la flexión de la pared del nervio. Sin embargo, el Caso (9) puede servir para evaluar tableros existentes cuando no hay diafragmas internos dentro de sus nervios cerrados.

- Alma de viga de tablero en su intersección con el nervio – De manera similar a los casos anteriores, se distingue entre los nervios cerrados con y sin diafragmas internos en el plano del alma de la viga de tablero. Para el Caso (10) se supone que el flujo de tensiones en el alma de la viga de tablero no es interrumpido por el recorte para el nervio; sin embargo, a la tensión axial f_1 se le debe sumar una componente de tensión axial adicional que actúa sobre las soldaduras de conexión debido al campo de tensiones en el “diente” del alma de la viga que provoca el corte aplicado en la unión entre la viga y la placa de tablero. Hay una tensión de flexión local f_2 en el alma de la viga debida a la flexión fuera del plano del alma que provoca la rotación del nervio en su plano bajo los efectos de las sobrecargas asimétricas que actúan sobre el tablero. Ambas tensiones f_1 y f_2 en el talón de la soldadura son directamente aditivas; sin embargo, al verificar la capacidad de carga de las soldaduras de filete mediante la Ec. 6.6.1.2.5-3 sólo se debe incluir la tensión f_1 . La conexión entre la pared del nervio y el alma de la viga o entre la pared del nervio y el diafragma interno también se puede materializar combinando soldaduras de ranura y de filete. Se ha hallado que la resistencia a la fatiga de las uniones con soldaduras combinadas de ranura y de filete corresponde a la Categoría C y no es determinada por la Ec. 6.6.1.2.5-3. Ver también la Nota e), Figura 9.8.3.7.4-1. La tensión f_2 se puede calcular en base a la rotación del nervio considerando diferentes sobrecargas variables y parámetros geométricos que tomen en cuenta las restricciones contra la rotación en el apoyo del nervio, por ejemplo la profundidad de la viga de tablero y el espesor del alma de la viga. Para el Caso (11), sin diafragma interno, las tensiones en el alma son extremadamente complejas y se aplican los comentarios que se expusieron para el Caso (9).

- Placa de tablero en la conexión al alma de la viga de tablero – Para el Caso (12) se aplican las consideraciones básicas correspondientes a un flujo de tensiones en dirección paralela al alma de la viga de tablero que es desviado localmente por una soldadura longitudinal, caso para el cual generalmente se asigna la Categoría E. Solamente se producirá tensión de tracción en el tablero (relevante para el análisis a fatiga) si las vigas de tablero son continuas sobre una viga longitudinal o si están en voladizo. En los tableros con nervios cerrados que se utilizan en diseños tradicionales en los cuales la placa de tablero no tiene apoyo sobre la cavidad del nervio también habrán tensiones locales adicionales en la placa del tablero en la dirección del alma de la viga de tablero. La concentración de flujo de tensiones resultante en los bordes de los “dientes” de las vigas de tablero pueden provocar picos de tensión muy elevados. Esto ha ocasionado un elevado nivel de fisuración en ciertas placas de tablero cuyo espesor era menor o igual que 12 mm. Esta tensión local adicional fuera del plano se puede reducir prolongando el diafragma interno dentro del nervio cerrado y ajustándolo contra la cara inferior de la placa de tablero de manera de proveer un apoyo continuo (*Wolchuk 1999*). La reducción de estas tensiones en placas de tablero de mayor espesor aún no ha sido estudiada. El uso de un acabado superficial de gran espesor también puede contribuir a una mayor distribución de las cargas y a reducir las tensiones sobre la placa de tablero. Ensayos de fatiga realizados sobre un prototipo de tablero ortótropo a escala real demostraron que una placa de tablero de 16 mm de espesor era suficiente para evitar la fisuración luego de 15.5 millones de ciclos. La carga aplicada en estos ensayos fue de 3.6 veces la carga de rueda equivalente correspondiente al Estado Límite de Fatiga y sobre el prototipo ensayado no se colocó ninguna superficie de rodamiento. Sin embargo, el mínimo espesor de placa de tablero permitido por la presente especificación es de 14 mm. Si se utilizan diafragmas interiores, como medida de precaución se sugiere prolongar los diafragmas para que se ajusten a la cara inferior del tablero, especialmente si la separación entre nervios es importante.
 - El Artículo C9.8.3.7.4 contiene comentarios adicionales sobre el uso de diafragmas internos en lugar de recortes en el alma de las vigas de tablero.
-

Tabla 6.6.1.2.3-1 Categorías para diseño a fatiga inducida por las cargas

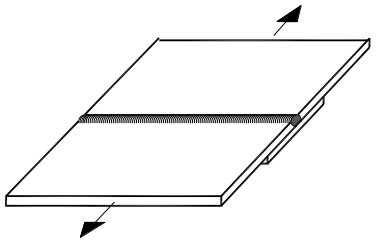
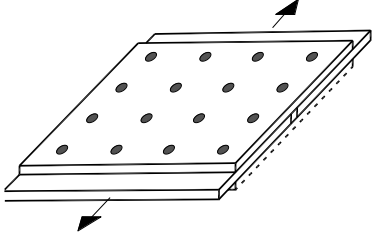
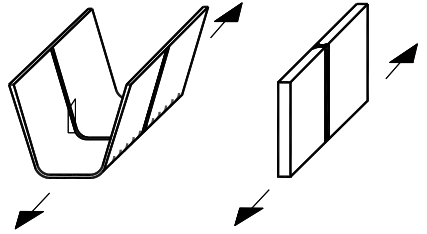
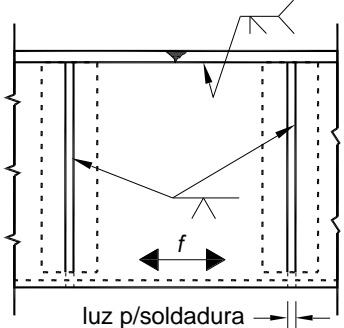
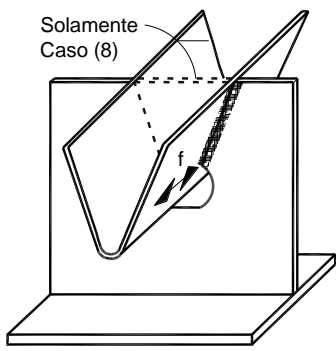
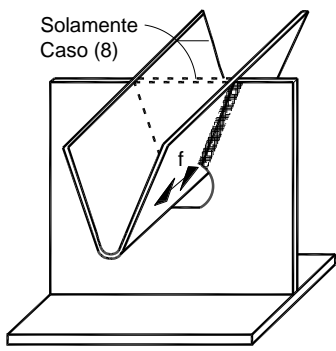
| CONDICIÓN GENERAL | ESTADO | CATEGORÍA | EJEMPLOS, VER FIG. 6.6.1.2.3-1 |
|--|--|---|--------------------------------------|
| Elementos simples | <p>Metal base:</p> <ul style="list-style-type: none"> Con superficies laminadas o limpias, bordes cortados con llama y rugosidad superficial AASHTO/AWS D1.5M/D1.5 (Sección 3.2.2) menor o igual que 0.025 mm De acero autoprotegido sin pintar, todos los grados, diseñados y detallados de acuerdo con FHWA (1989) En la sección neta de las cabezas de las barras de ojo y placas para pasadores | <p>A</p> <p>B</p> <p>E</p> | 1, 2 |
| Elementos armados | <p>Metal base y metal de soldadura en componentes sin accesorios, conectados mediante:</p> <ul style="list-style-type: none"> Soldaduras de ranura continuas de penetración total cuando se retiren las barras de respaldo Soldaduras de filete continuas paralelas a la dirección de la tensión aplicada Soldaduras de ranura continuas de penetración total cuando no se retiren las barras de respaldo Soldaduras de ranura continuas de penetración parcial paralelas a la dirección de la tensión aplicada <p>Metal base en los extremos de cubrejuntas de largo parcial:</p> <ul style="list-style-type: none"> Con uniones abulonadas antideslizantes en los extremos De ancho menor que el ala, con o sin soldaduras en los extremos, o de ancho mayor que el ala con soldaduras en los extremos <ul style="list-style-type: none"> espesor de ala ≤ 20 mm espesor de ala > 20 mm De ancho mayor que el ala sin soldaduras en los extremos | <p>B</p> <p>B</p> <p>B'</p> <p>B'</p> <p>B</p> <p>E</p> <p>E'</p> <p>E'</p> | <p>3, 4, 5, 7</p> <p>22</p> <p>7</p> |
| Empalmes de elementos conectados mediante soldadura de ranura cuando se establezca mediante ensayos no destructivos que la soldadura es aceptable y con amolado de la soldadura en la dirección de las tensiones aplicadas | <p>Metal base y metal de soldadura en empalmes de elementos conectados mediante soldaduras de ranura de penetración total:</p> <ul style="list-style-type: none"> Entre placas con secciones transversales similares y terminación suave de la soldadura por amolado Con transiciones de 600 mm de radio y terminación suave de la soldadura por amolado Con transiciones de ancho o espesor y terminación con amolado de las soldaduras para obtener pendientes no mayores que 1.0 en 2.5 <ul style="list-style-type: none"> metal base grados 690/690W metal base de otros grados | <p>B</p> <p>B</p> <p>B'</p> <p>B</p> | <p>8, 10</p> <p>13</p> <p>11, 12</p> |

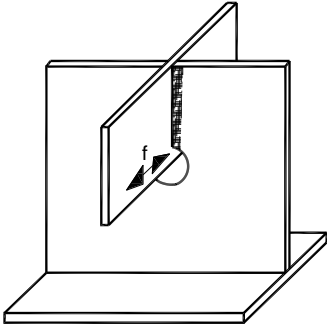
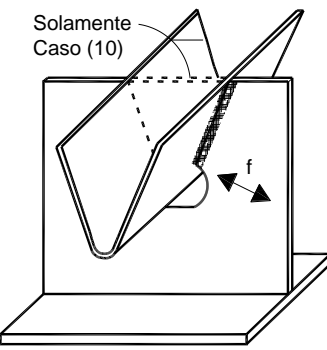
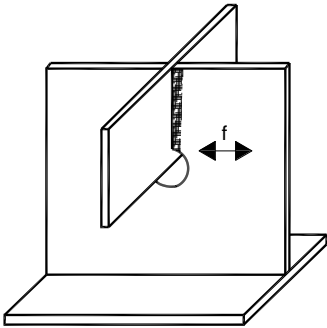
| CONDICIÓN GENERAL | ESTADO | CATEGORÍA | EJEMPLOS, VER FIG. 6.6.1.2.3-1 |
|---|--|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> Con o sin transiciones con pendientes no mayores que 1.0 en 2.5 cuando no se retire el respaldo de las soldaduras | C | 8, 10, 11, 12 |
| Accesorios unidos mediante soldaduras de ranura cargadas longitudinalmente | <p>Metal base en detalles unidos mediante soldaduras de ranura de penetración total o parcial:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuando la longitud del detalle en la dirección de la tensión aplicada es: <ul style="list-style-type: none"> menor que 50 mm entre 50 mm y 12 veces el espesor del detalle, pero menor que 100 mm mayor que 12 veces el espesor del detalle o mayor que 100 mm <ul style="list-style-type: none"> espesor del detalle < 25 mm espesor del detalle \geq 25 mm Con un radio de transición y con amolado de las soldaduras de los extremos, cualquiera sea la longitud del detalle: <ul style="list-style-type: none"> radio de transición \geq 600 mm 600 mm > radio de transición \geq 150 mm 150 mm > radio de transición \geq 50 mm radio de transición < 50 mm Con un radio de transición y sin amolado de las soldaduras de los extremos | C D E E' B C D E E | 6, 15 15 15 15 16 |
| Accesorios unidos mediante soldaduras de ranura cargadas transversalmente cuando se establezca mediante ensayos no destructivos que la soldadura es aceptable y con amolado de la soldadura en la dirección perpendicular a dirección de la tensión | <p>Metal base en detalles unidos mediante soldaduras de ranura de penetración total con un radio de transición:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuando los espesores de placa sean iguales y se retire el respaldo de las soldaduras: <ul style="list-style-type: none"> radio de transición \geq 600 mm 600 mm > radio de transición \geq 150 mm 150 mm > radio de transición \geq 50 mm radio de transición < 50 mm Cuando los espesores de placa sean iguales y no se retire el respaldo de las soldaduras: <ul style="list-style-type: none"> radio de transición \geq 150 mm 150 mm > radio de transición \geq 50 mm radio de transición < 50 mm Cuando los espesores de placa sean desiguales y se retire el respaldo de las soldaduras: <ul style="list-style-type: none"> radio de transición \geq 50 mm | B C D E C D E D | 16 |

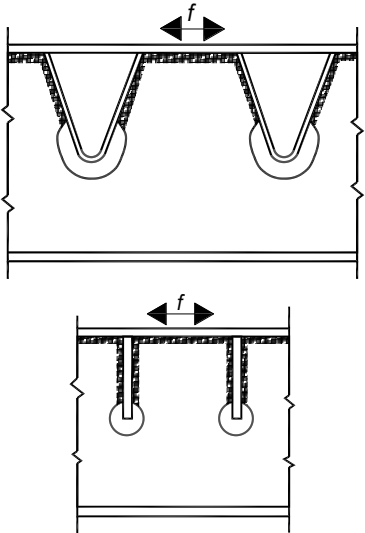
| CONDICIÓN GENERAL | ESTADO | CATEGORÍA | EJEMPLOS, VER FIG. 6.6.1.2.3-1 |
|--|--|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> radio de transición < 50 mm Para cualquier radio de transición cuando los espesores de placa sean desiguales y no se retire el respaldo de las soldaduras | E E | |
| Uniones mediante soldaduras de filete cuando hay soldaduras normales a la dirección de la tensión | <p>Metal base:</p> <ul style="list-style-type: none"> En detalles que no sean una unión entre un rigidizador transversal y un ala ni una unión entre un rigidizador transversal y un alma En el talón de las soldaduras entre un rigidizador transversal y un ala y entre un rigidizador transversal y un alma | Menor entre C y la Ec. 6.6.1.2.5-3 C' | 14 6 |
| Uniones mediante soldaduras de filete cuando hay soldaduras normales y/o paralelas a la dirección de la tensión | <p>Tensión de corte en la garganta de la soldadura</p> <p>Metal base en el extremo de la soldadura</p> | E | 9 |
| Detalles unidos mediante soldaduras de filete cargadas longitudinalmente | <p>Metal base en detalles unidos mediante soldaduras de filete:</p> <ul style="list-style-type: none"> Cuando la longitud del detalle en la dirección de la tensión aplicada es: <ul style="list-style-type: none"> menor que 50 mm o conectores de corte tipo perno entre 50 mm y 12 veces el espesor del detalle, pero menor que 100 mm mayor que 12 veces el espesor del detalle o mayor que 100 mm <ul style="list-style-type: none"> espesor del detalle < 25 mm espesor del detalle \geq 25 mm Con un radio de transición y con amolado de las soldaduras de los extremos, cualquiera sea la longitud del detalle: <ul style="list-style-type: none"> radio de transición \geq 50 mm radio de transición < 50 mm Con un radio de transición y sin amolado de las soldaduras de los extremos | C D E E' D E E | 15, 17, 18, 20 15, 17 7, 9, 15, 17 16 16 |
| Detalles unidos mediante soldaduras de filete cargadas transversalmente cuando hay soldaduras paralelas a la dirección de la tensión principal | <p>Metal base en detalles unidos mediante soldaduras de filete:</p> <ul style="list-style-type: none"> Con un radio de transición y con amolado de las soldaduras de los extremos,: <ul style="list-style-type: none"> radio de transición \geq 50 mm radio de transición < 50 mm Con un radio de transición y sin amolado de las soldaduras de los extremos | D E E | 16 |

| CONDICIÓN GENERAL | ESTADO | CATEGORÍA | EJEMPLOS, VER FIG. 6.6.1.2.3-1 |
|---------------------------------------|---|-----------|--------------------------------------|
| Uniones mecánicas | Metal base: | | 21 |
| | <ul style="list-style-type: none"> En la sección bruta de las uniones abulonadas antideslizantes de alta resistencia, excepto cuando la configuración de la unión provoca flexión fuera del plano en los materiales conectados | B | |
| | <ul style="list-style-type: none"> En la sección neta de las uniones abulonadas de alta resistencia que no sean antideslizantes | B | |
| Barras de ojo o placas para pasadores | En la sección neta de las uniones remachadas | D | |
| | Metal base en la sección neta de la cabeza de la barra de ojo, o placa para pasador | E | 23, 24 |
| | Metal base en el vástago de las barras de ojo, o a través de la sección bruta de placas para pasadores con: | | |
| | <ul style="list-style-type: none"> Superficies laminadas o amoladas | A | 23, 24 |
| | <ul style="list-style-type: none"> Bordes cortados con llama | B | 23, 24 |

Tabla 6.6.1.2.3-2 Categorías de los detalles para el diseño de tableros ortótropos a fatiga inducida por las cargas

| EJEMPLO ILUSTRATIVO | DETALLE | DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN | CATEGORÍA |
|---|--|---|-----------|
|  | Empalme transversal o longitudinal en placas de tablero o nervios | (1) Barra de respaldo cerámica. Soldadura amolada en dirección paralela a la tensión. | B |
| | Soldadura a tope de ranura simple | (2) Barra de respaldo cerámica. | C |
| | | (3) Barra de respaldo permanente. Las soldaduras de filete con barras de respaldo deberán ser continuas si están fuera de la ranura o podrán ser intermitentes si están dentro de la ranura | D |
|  | Empalme abulonado en placas de tablero o nervios | (4) En empalmes asimétricos, al calcular la tensión se deberán considerar los efectos de la excentricidad | B |
|  | Soldaduras de ranura doble | (5) Placas de secciones transversales similares con soldaduras amoladas. Se deberán utilizar pestañas sobrantes, las cuales posteriormente se deberán retirar; los bordes de las placas se deberán amolar en la dirección de la tensión | B |
| | | (6) La altura de la convexidad de las soldaduras no deberá ser mayor que 20% del ancho de las mismas. Se deberán utilizar pestañas sobrantes al igual que para la condición (5) | C |
|  | Empalmes tipo "ventana" en los nervios, realizados en obra | (7) Barra de respaldo permanente para empalme en nervio | D |
|  | Soldadura a tope de ranura simple | Luz para soldadura > espesor de pared del nervio | D |
| | | f = rango de tensión axial en la parte inferior del nervio | |
| | Pared del nervio en la intersección nervio / viga de tablero | (8) Nervio cerrado con diafragma interno dentro del nervio o nervio abierto | C |
|  | Soldaduras de filete entre un nervio y el alma de la viga de tablero | f = rango de tensión axial en la pared del nervio en el extremo inferior de la soldadura nervio / viga de tablero | C |
| | | (9) Nervio cerrado, sin diafragma interno dentro del nervio | |

| EJEMPLO ILUSTRATIVO | DETALLE | DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN | CATEGORÍA |
|---|--|---|--|
|  | | $f = f_1 + f_2$ f_1 = rango de tensión axial en la pared del nervio f_2 = rango de tensión de flexión local en la pared del nervio debido a la flexión fuera del plano provocada por la interacción entre el nervio y la viga de tablero, obtenido mediante un análisis racional | |
| <p>Solamente Caso (10)</p>   | <p>Alma de la viga de tablero en la intersección nervio / viga de tablero</p> <p>Soldaduras de filete entre un nervio y el alma de la viga de tablero y entre el nervio y el diafragma interno</p> | <p>(10) Nervio cerrado con diafragma interno o nervio abierto</p> <p>f = componente del rango de tensión axial en el alma de la viga de tablero perpendicular a la soldadura = $f_1 + f_2$</p> <p>f_1 = rango de tensión axial en el alma</p> <p>f_2 = rango de tensión de flexión en el alma debido a la flexión fuera del plano provocada la rotación del nervio en el apoyo</p> <p>Las tensiones f_1 y f_2 se deberán obtener mediante un análisis racional</p> <p>(11) Nervio cerrado sin diafragma interno</p> <p>$f = f_1 + f_2$</p> <p>f = rango de tensión de interacción entre el “diente” del alma de la viga de tablero y la pared del nervio, obtenido mediante un análisis racional</p> <p>f_2 igual que se definió para el Caso (10)</p> | <p>Menor entre C y la Ec. 6.6.1.2.5-3</p> <p>C para combinación de soldaduras de filete y de ranura</p> <p>C</p> |

| EJEMPLO ILUSTRATIVO | DETALLE | DESCRIPCIÓN DE LA CONDICIÓN | CATEGORÍA |
|---|---|--|-----------|
|  | Placa de tablero en su conexión al alma de la viga de tablero | (12) f = rango de tensión axial en la placa de tablero en la soldadura tablero/viga de tablero | E |



6.6.1.2.4 Detalles cuyo uso está prohibido

No se deberán utilizar soldaduras de ranura de penetración parcial cargadas transversalmente, excepto como se permite en el Artículo 9.8.3.7.2.

No se deberán utilizar placas de empalme unidas a superficies de alas de vigas sólo por medio de soldaduras de filete transversales.

6.6.1.2.5 Resistencia a la fatiga

A excepción de lo especificado a continuación, la resistencia nominal a la fatiga se deberá tomar como:

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \geq \frac{1}{2} (\Delta F)_{TH} \quad (6.6.1.2.5-1)$$

donde:

$$N = (365)(75)n(ADTT)_{SL} \quad (6.6.1.2.5-2)$$

y donde:

A = constante tomada de la Tabla 1 (MPa^2)

n = número de ciclos por pasada de camión tomado de la Tabla 2

$(ADTT)_{SL}$ = $ADTT$ en un único carril como se especifica en el Artículo 3.6.1.4

$(\Delta F)_{TH}$ = umbral de fatiga para amplitud constante tomado de la Tabla 3 (MPa)

C6.6.1.2.5

En términos de los ciclos, la resistencia a la fatiga por encima del umbral de fatiga para amplitud constante es inversamente proporcional al cubo del rango de tensiones. Por ejemplo, si el rango de tensiones se reduce a la mitad, la vida a fatiga se multiplica por 2^3 .

El requisito que establece que para puentes sujetos a mayores volúmenes de tráfico el máximo rango de tensiones experimentado por un detalle debe ser menor que el umbral de fatiga para amplitud constante proporciona una vida a fatiga teóricamente infinita. Se asume que el máximo rango de tensiones es dos veces el rango de tensiones por sobrecarga viva debida al paso de la carga de fatiga, mayorada aplicando el factor de carga indicado en la Tabla 3.4.1-1 para la combinación de cargas correspondiente a fatiga.

En las Especificaciones Estándares AASHTO 2002 el umbral de fatiga para amplitud constante se denomina rango admisible de tensiones de fatiga para más de 2 millones de ciclos en una estructura con recorridos de cargas redundantes.

Al desarrollar estas Especificaciones para Diseño por Factores de Carga y Resistencia se consideró una vida de diseño de 75 años. Si el diseñador desea utilizar una vida de diseño diferente, en la ecuación para calcular N puede utilizar un número diferente de 75.

La Figura C1 muestra una gráfica de la resistencia nominal a la fatiga para las Categorías A a E':

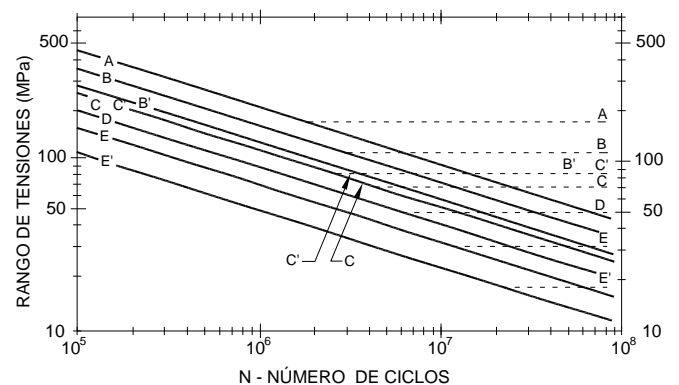


Figura C6.6.1.2.5-1 Rango de tensiones en función del número de ciclos

Cuando el rango de tensiones de diseño es menor que la mitad del umbral de fatiga para amplitud constante el detalle proveerá una vida a fatiga teóricamente infinita. A excepción de las Categorías E y E', para volúmenes de tráfico más elevados el diseño casi siempre será determinado por la verificación para vida infinita. La Tabla C1 indica los valores de $(ADTT)_{SL}$ por encima de los cuales la verificación para vida infinita resulta determinante, suponiendo una vida de diseño de 75 años y un ciclo por camión.

Tabla C6.6.1.2.5-1 $(ADTT)_{SL}$ para un período de 75 años, equivalente a vida infinita

| Categoría | $(ADTT)_{SL}$ para un período de 75 años, equivalente a vida infinita (camiones por día) |
|-----------|--|
| A | 535 |
| B | 865 |
| B' | 1035 |
| C | 1290 |
| C' | 745 |
| D | 1875 |
| E | 3545 |
| E' | 6525 |

Los valores de la tabla anterior se calcularon usando los valores de A y $(\Delta F)_{TH}$ especificados en las Tablas 1 y 3, respectivamente. Los valores del $(ADTT)_{SL}$ para 75 años que se obtienen utilizando los valores de A y $(\Delta F)_{TH}$ de las Especificaciones en unidades del Sistema Inglés o del Sistema Internacional de Unidades (SI) son levemente diferentes. Los valores indicados en la tabla anterior corresponden al mayor valor obtenido de ambas versiones de las Especificaciones redondeado a los 5 camiones diarios más cercanos.

Cuando se carga una placa discontinua, el rango de resistencia a la fatiga para el metal base en los detalles unidos mediante soldaduras de filete cargadas transversalmente se deberá tomar como:

$$(\Delta F)_n = (\Delta F)_n^c \left(\frac{0.094 + 1.23 \frac{H}{t_p}}{t_p^{1/6}} \right) \leq (\Delta F)_n^c \quad (6.6.1.2.5-3)$$

donde:

La Ecuación 3 asume que no hay penetración en la raíz de la soldadura. Frank y Fisher (1979) discuten el desarrollo de la Ecuación 3.

En las Especificaciones Estándares AASHTO 2002 se especifican rangos de tensiones admisibles tanto para elementos redundantes como para elementos no redundantes. Debido a la mayor gravedad de las potenciales consecuencias de la falla de un elemento no redundante, los valores admisibles para elementos no redundantes se han fijado arbitrariamente iguales a 80 por ciento de los valores correspondientes a elementos redundantes. No obstante esto, para los elementos no redundantes también se especifica una mayor tenacidad a la fractura. Considerados en forma conjunta, la reducción del rango de tensiones

$(\Delta F)_n^c$ = resistencia nominal a la fatiga para la Categoría C (MPa)

H = garganta efectiva de la soldadura de filete (mm)

t_p = espesor de la placa cargada (mm)

admisibles y la mayor tenacidad a la fractura constituyen una innecesaria doble penalización para los elementos no redundantes. En esta versión de las Especificaciones se ha conservado el requisito que especifica mayor tenacidad a la fractura. Por lo tanto, los rangos de tensiones admisibles representados por la Ecuación 1 son aplicables tanto para elementos redundantes como para elementos no redundantes.

Tabla 6.6.1.2.5-1 Constante A según la Categoría para diseño a fatiga

| CATEGORÍA PARA DISEÑO A FATIGA | CONSTANTE A $\times 10^{11}$ (MPa ³) |
|--|---|
| A | 82.0 |
| B | 39.3 |
| B' | 20.0 |
| C | 14.4 |
| C' | 14.4 |
| D | 7.21 |
| E | 3.61 |
| E' | 1.28 |
| Bulones M 164M (A 325M) en tracción axial | 5.61 |
| Bulones M 253M (A 490M) en tracción axial | 10.3 |

Tabla 6.6.1.2.5-2 Ciclos por pasada de camión, n

| Elementos longitudinales | Longitud de tramo | |
|-------------------------------|-------------------|-------------|
| | > 12 000 mm | ≤ 12 000 mm |
| Vigas de un solo tramo | 1.0 | 2.0 |
| Vigas continuas | | |
| 1) cerca de un apoyo interior | 1.5 | 2.0 |
| 2) otras ubicaciones | 1.0 | 2.0 |
| Vigas en voladizo | 5.0 | |
| Celosías | 1.0 | |
| Elementos transversales | Separación | |
| | > 6000 mm | ≤ 6000 mm |
| | 1.0 | 2.0 |

A los fines de determinar los ciclos de tensión por pasada de camión correspondientes a tramos continuos se deberá considerar que una distancia igual a un décimo de la longitud del tramo a cada lado de los apoyos interiores se considera “cerca de un apoyo interior”.

El número de ciclos por pasada para las vigas en voladizo se toma igual a 5.0 debido a que este tipo de puentes tienen tendencia a sufrir grandes vibraciones que provocan ciclos adicionales después que el camión lo ha abandonado (*Moses et al. 1987; Schilling 1990*).

Tabla 6.6.1.2.5-3 Umbrales de fatiga para amplitud constante

| Categoría | Umbral (MPa) |
|--|--------------|
| A | 165.0 |
| B | 110.0 |
| B' | 82.7 |
| C | 69.0 |
| C' | 82.7 |
| D | 48.3 |
| E | 31.0 |
| E' | 17.9 |
| Bulones M 164M (A 325M) en tracción axial | 214.0 |
| Bulones M 253M (A 490M) en tracción axial | 262.0 |

6.6.1.3 Fatiga inducida por distorsión

Se deberán proveer recorridos de cargas que sean suficientes para transmitir todas las fuerzas intencionales y no intencionales conectando todos los elementos transversales a componentes adecuados que comprendan la sección transversal del elemento longitudinal. Los recorridos de carga se deberán proveer conectando los diferentes componentes ya sea mediante soldaduras o bien mediante bulones.

Para controlar el pandeo del alma y la flexión elástica del alma se deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.5.3.

6.6.1.3.1 Placas de unión transversales

Las placas de unión se deberán soldar o abulonar tanto a las alas de compresión como a las alas de tracción de la sección transversal cuando haya:

- Diafragmas o marcos transversales de unión conectados a placas de unión transversales o a rigidizadores transversales que funcionen como placas de unión,
- Diafragmas o marcos transversales internos o externos conectados a placas de unión transversales o a rigidizadores transversales que funcionen como placas de unión, y
- Vigas de tablero conectadas a placas de unión transversales o a rigidizadores transversales que funcionen como placas de unión.

C6.6.1.3

Estos recorridos de cargas rígidos son necesarios para evitar que se desarrollen tensiones secundarias significativas que podrían provocar el crecimiento de las fisuras por fatiga ya sea en el elemento longitudinal o en el elemento transversal (*Fisher et al. 1990*).

C6.6.1.3.1

Estos requisitos aparecen en el Artículo 10.20 de las Especificaciones Estándares AASHTO “Diafragmas y Marcos Transversales” sin ninguna explicación de la lógica en que se basan y sin ninguna referencia a la fatiga inducida por distorsión.

Estos requisitos se aplican tanto a diafragmas entre elementos longitudinales como a diafragmas internos dentro de los propios elementos longitudinales.

La carga de 90 000 N constituye una regla práctica aplicable al caso de los puentes rectos no oblicuos. En el caso de puentes curvos u oblicuos, las fuerzas que actúan sobre los diafragmas se deberían determinar mediante un análisis racional (*Keating et al. 1990*).

En las secciones tipo cajón con frecuencia las almas se unen a las alas superiores y se instalan placas de unión y rigidizadores transversales; luego estos conjuntos se unen al

En ausencia de información más precisa, la unión soldada o abulonada se debería diseñar para resistir una carga lateral de 90 000 N para el caso de puentes rectos no oblicuos.

6.6.1.3.2 Placas de unión laterales

Si no es posible conectar las placas de unión laterales a las alas, las placas de unión laterales sobre las almas rigidizadas se deberían ubicar a una distancia vertical no menor que un medio del ancho de ala por encima o por debajo del ala. Las placas de unión laterales conectadas a almas no rigidizadas se deberían ubicar como mínimo 150 mm por encima o por debajo del ala pero a una distancia no menor que un medio del ancho del ala, tal como se especificó anteriormente.

Los extremos de los elementos de arriostramiento lateral sobre la placa de unión se deberán mantener como mínimo a 100 mm del alma y de cualquier rigidizador transversal.

Si se utilizan rigidizadores, las placas de unión laterales se deberán centrar sobre el rigidizador, ya sea que la placa esté del mismo lado del alma que el rigidizador o no. Si la placa de unión lateral está del mismo lado del alma que el rigidizador, ésta se deberá conectar al rigidizador. En esta ubicación el rigidizador transversal deberá ser continuo desde el ala de compresión hasta el ala de tracción y deberá estar conectado a ambas alas.

6.6.1.3.3 Tableros ortótropos

Los detalles deberán satisfacer todos los requisitos del Artículo 9.8.3.7.

6.6.2 Fractura

Los planos deberán especificar todos los componentes y conexiones principales que soportan solicitaciones de tracción debido a la combinación de cargas para el Estado Límite de Resistencia I, según lo especificado en la Tabla 3.4.1-1, y otros elementos que requieran tenacidad a la

ala común de la sección tipo cajón. Para soldar las almas de forma continua al ala que está dentro de la sección tipo cajón, los detalles deben permitir que la cabeza del soldador pueda pasar más allá del fondo de las placas de unión y los rigidizadores. Cuando se provean detalles para permitir el ingreso de la cabeza del soldador, también se deberá proveer un detalle que permita la posterior conexión de las placas de unión al ala del cajón, tal como se requiere en este artículo. También puede ser necesario utilizar un detalle similar para cualquier rigidizador transversal intermedio que deba ser conectado al ala del cajón. Se recomienda que el Ingeniero consulte con los fabricantes acerca de cuál sería la mejor manera de fabricar la sección tipo cajón y que además proporcione detalles alternativos en los planos si fuera necesario.

C6.6.1.3.2

La mínima distancia al ala especificada pretende reducir la distorsión fuera del plano que se concentra en el alma entre la placa de unión lateral y el ala a una magnitud tolerable. También permite un adecuado acceso de los electrodos y mueve la placa de unión más cerca del eje neutro de la viga para reducir el impacto de la terminación de la soldadura sobre la resistencia a la fatiga.

Este requisito reduce las potenciales tensiones inducidas por la distorsión en la luz entre el alma o el rigidizador y los elementos laterales sobre la placa lateral. Estas tensiones pueden ser provocadas por la vibración del sistema lateral.

C6.6.1.3.3

El propósito de este requisito es controlar la fatiga inducida por distorsión de los detalles del tablero sujetos a tensiones locales secundarias debidas a la flexión fuera del plano.

C6.6.2

El material para elementos portantes principales sujetos a tensiones de tracción requieren propiedades adicionales referentes al impacto tal como se especifica en las Especificaciones AASHTO para Materiales. El fundamento y la filosofía detrás de estos requisitos se indican en AISI

fractura de acuerdo con el ensayo de impacto Charpy sobre probeta con entalladura en V.

La zona de temperatura apropiada se deberá determinar a partir de la mínima temperatura de servicio aplicable especificada en la Tabla 1 y deberá estar indicada en la documentación técnica.

Los requisitos sobre la tenacidad a la fractura deberán ser como se indica en la Tabla 2 de acuerdo con la zona de temperatura apropiada. La resistencia a la fluencia se deberá tomar como el valor indicado en el Informe de Ensayo en Fábrica certificado.

Si la resistencia a la fluencia de los aceros AASHTO M 270M, Grados 345/345W (ASTM A 709M, Grado 345/345W) es mayor que 450 MPa, la temperatura de ensayo se deberá reducir 8°C por cada incremento de 70 MPa por encima de 450 MPa.

Si la resistencia a la fluencia de los aceros AASHTO M 270M, Grado HPS 485W (ASTM A 709M, Grado HPS 485W) es mayor que 585 MPa, la temperatura de ensayo se deberá reducir 8°C por cada incremento de 70 MPa por encima de 585 MPa.

El Ingeniero tendrá la responsabilidad de determinar cuál, si es que algún, componente es un elemento de fractura crítica (FCM). La ubicación de todos los elementos de fractura crítica deberá estar claramente indicada en la documentación técnica.

Cualquier accesorio cuya longitud en la dirección de la tensión de tracción sea mayor que 100 mm y que esté soldado a una zona traccionada de un componente de un elemento de fractura crítica deberá ser considerado parte del componente traccionado y también de fractura crítica.

(1975).

Los requisitos para el ensayo de impacto Charpy sobre probeta con entalladura en V varían dependiendo del tipo de acero, el tipo de construcción, si las conexiones son soldadas o mecánicas, y de la mínima temperatura de servicio aplicable.

Los elementos cuya fractura sea crítica se deberán fabricar de acuerdo con la Sección 12 del Código para Soldadura de Puentes AASHTO/AWS D1.5M/D1.5.

El material para elementos o componentes designados como de fractura crítica deberá ser ensayado de acuerdo con AASHTO T 243M (ASTM A 673M) Frecuencia P, excepto las placas de material AASHTO M 270M, Grados 250, 345, 345W, HPS 345W y HPS 485W (ASTM A 709M, Grados 250, 345, 345W, HPS 345W y HPS 485W), en cuyo caso las probetas se deberán seleccionar de la siguiente manera:

- De las placas laminadas sin tratamiento adicional se deberán tomar muestras en cada extremo de cada placa.
- De las placas normalizadas se deberán tomar muestras en un extremo de cada placa luego del tratamiento térmico.
- De las placas templadas y revenidas se deberán tomar muestras en cada extremo de cada placa luego del tratamiento térmico.

El material AASHTO M 270M, Grados 250, 345, 345S, 345W y HPS 345W (ASTM A 709M, Grados 250, 345, 345S, 345W y HPS 345W) para componentes que no han sido designados como de fractura crítica deberá ser ensayado de acuerdo con AASHTO T 243M (ASTM A 673M) Frecuencia H. El material AASHTO M 270M, Grados HPS 485W, 690 y 690W (ASTM A 707M, Grados HPS 485W, 690 y 690W) para componentes que no han sido designados como de fractura crítica deberá ser ensayado de acuerdo con AASHTO T 243M (ASTM A

673M), Frecuencia P.

Tabla 6.6.2-1 Zonas de temperatura para los requisitos del ensayo Charpy

| Mínima temperatura de servicio | Zona de temperatura |
|--------------------------------|---------------------|
| Mayor o igual que -18°C | 1 |
| Entre -19°C y -34°C | 2 |
| Entre -35°C y -51°C | 3 |

Tabla 6.6.2-2 Requisitos sobre tenacidad a la fractura

| UNIONES SOLDADAS O MECÁNICAS | GRADO (P.F./R.F.) | ESPESOR (mm) | ELEMENTOS DE FRACTURA CRÍTICA | | | | ELEMENTOS DE FRACTURA NO CRÍTICA | | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | | MIN. VALOR ENERGÍA ENSAYO (Joules) | ZONA 1 (Joules a °C) | ZONA 2 (Joules a °C) | ZONA 3 (Joules a °C) | ZONA 1 (Joules a °C) | ZONA 2 (Joules a °C) | ZONA 3 (Joules a °C) |
| SOLDADAS | 250 | $t \leq 100$ | 27 | 34 a 21 | 34 a 4 | 34 a -12 | 20 a 21 | 20 a 4 | 20 a -12 |
| | 345/345S/345W | $t \leq 50$ | 27 | 34 a 21 | 34 a 4 | 34 a -12 | 20 a 21 | 20 a 4 | 20 a -12 |
| | | $50 < t \leq 100$ | 33 | 41 a 21 | 41 a 4 | 41 a -12 | 27 a 21 | 27 a 4 | 27 a -12 |
| | HPS 345W | $t \leq 100$ | 33 | 41 a -12 | 41 a -12 | 41 a -12 | 27 a -12 | 27 a -12 | 27 a -12 |
| | HPS 485W | $t \leq 100$ | 38 | 48 a -23 | 48 a -23 | 48 a -23 | 34 a -23 | 34 a -23 | 34 a -23 |
| | 690/690W | $t \leq 65$ | 38 | 48 a -1 | 48 a -18 | 48 a -34 | 34 a -1 | 34 a -18 | 34 a -34 |
| | | $65 < t \leq 100$ | 49 | 68 a -1 | 68 a -18 | no permitido | 48 a -1 | 48 a -18 | 48 a -34 |
| MECÁNICAS | 250 | $t \leq 100$ | 27 | 34 a 21 | 34 a 4 | 34 a -12 | 20 a 21 | 20 a 4 | 20 a -12 |
| | 345/345S/345W | $t \leq 100$ | 27 | 34 a 21 | 34 a 4 | 34 a -12 | 20 a 21 | 20 a 4 | 20 a -12 |
| | HPS 345W | $t \leq 100$ | 33 | 41 a -12 | 41 a -12 | 41 a -12 | 27 a -12 | 27 a -12 | 27 a -12 |
| | HPS 485W | $t \leq 100$ | 38 | 48 a -23 | 48 a -23 | 48 a -23 | 34 a -23 | 34 a -23 | 34 a -23 |
| | 690/690W | $t \leq 100$ | 38 | 48 a -1 | 48 a -18 | 48 a -34 | 34 a -1 | 34 a -18 | 34 a -34 |

6.7 REQUISITOS GENERALES DE DIMENSIONAMIENTO Y DETALLADO

6.7.1 Longitud de tramo efectiva

Las longitudes efectivas se deberán tomar como la distancia entre los centros de los apoyos.

6.7.2 Contraflechas para compensar los efectos de las cargas permanentes

Las estructuras de acero se deberían fabricar con contraflechas adecuadas para compensar las flechas que provoca la carga permanente y la falta de alineamiento vertical.

En los sistemas de celosía, arco y atirantados se podrán realizar modificaciones selectivas a las longitudes de los componentes, según corresponda, para:

- Ajustar la flecha debida a la carga permanente de manera de lograr la posición geométrica requerida,
- Reducir o eliminar el acortamiento de los nervios, y
- Ajustar el diagrama de momentos por cargas permanentes en las estructuras intermedias.

6.7.3 Mínimo espesor del acero

El acero estructural, incluyendo el acero utilizado para las riostras, marcos transversales y todo tipo de placas de empalme, excepto las almas de los perfiles laminados, los nervios cerrados en los tableros ortótropos, las placas de relleno y el acero de las barandas, no deberá tener menos de 8.0 mm de espesor.

El espesor del alma de las vigas o perfiles laminados y de los nervios cerrados de los tableros ortótropos no deberá ser menor que 7.0 mm.

Si se anticipa que el metal estará expuesto a importantes influencias corrosivas éste se deberá proteger especialmente contra la corrosión o bien se deberá especificar un espesor de metal sacrificable.

6.7.4 Diafragmas y marcos transversales

6.7.4.1 Disposiciones generales

Los diafragmas o marcos transversales se podrán colocar al final de la estructura, sobre los apoyos interiores y de manera intermitente a lo largo del tramo.

La necesidad de utilizar diafragmas o marcos transversales se deberá investigar para todas las etapas correspondientes a los procedimientos constructivos supuestos y también para la condición final.

La investigación debería incluir pero no limitarse a lo

C6.7.4.1

El requisito arbitrario de las Especificaciones AASHTO que establecía que la separación de los diafragmas no debía ser mayor que 7600 mm ha sido reemplazado por la exigencia de un análisis racional que muchas veces dará por resultado la eliminación de detalles y accesorios propensos a la fatiga.

siguiente:

- Transferencia de cargas de viento laterales de la parte inferior de la viga al tablero y del tablero a los apoyos,
- Estabilidad del alma inferior para todas las cargas cuando se encuentra en compresión,
- Estabilidad del ala superior en compresión antes del curado del tablero, y
- Distribución de las cargas permanentes y sobrecargas verticales aplicadas a la estructura.

Se podrá especificar que los diafragmas o marcos transversales requeridos para condiciones diferentes a la condición final sean temporarios.

Si el modelo estructural usado para determinar las solicitaciones incluye marcos transversales o diafragmas permanentes, éstos se deberán diseñar para todos los estados límites aplicables para las solicitaciones calculadas. Como mínimo, los diafragmas y marcos transversales se deberán diseñar para transmitir las cargas de viento de acuerdo con los requisitos del Artículo 4.6.2.7 y deberán satisfacer todos los requisitos de esbeltez aplicables establecidos en los Artículos 6.8.4 o 6.9.3.

Las placas de unión para diafragmas y marcos transversales deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.6.1.3.1.

En el extremo del puente y en los puntos intermedios en los cuales la continuidad de la losa esté interrumpida los bordes de la losa deberán ser soportados mediante diafragmas u otros medios adecuados como se especifica en el Artículo 9.4.4.

6.7.4.2 Secciones doble Te rectas

Los diafragmas o marcos transversales para vigas laminadas deberán tener al menos la mitad de la profundidad de la viga. Los diafragmas o marcos transversales para vigas compuestas deberán ser tan profundos como resulte posible.

Los marcos transversales o diafragmas de los extremos se deberán dimensionar para transmitir todas las fuerzas laterales a los apoyos. Si el marco transversal o diafragma del extremo es oblicuo se deberá considerar la componente longitudinal de la fuerza transmitida por la unidad oblicua. Si la oblicuidad de los apoyos es mayor que 20° los marcos transversales intermedios deberán ser normales a los elementos principales. Si los apoyos son oblicuos no será necesario que los marcos transversales sean colineales con la línea de apoyos.

Los diafragmas de los extremos se deberán diseñar para las fuerzas y la distorsión transmitidas por el tablero y la

junta del tablero. Al diseñar la conexión entre el componente longitudinal y los diafragmas se deberán considerar los momentos en los extremos de los diafragmas.

6.7.4.3 Secciones tipo cajón rectas

Dentro de las secciones tipo cajón se deberán proveer diafragmas o marcos transversales en cada apoyo para resistir la rotación transversal, el desplazamiento y la distorsión de la sección transversal. Estos diafragmas o marcos transversales se deberán diseñar para transmitir momentos torsores y fuerzas laterales del cajón a los apoyos.

Para las secciones transversales compuestas por dos o más cajones, en los apoyos extremos se deberán utilizar diafragmas o marcos transversales externos entre los cajones. En los apoyos interiores y en ubicaciones intermedias se podrán utilizar marcos transversales externos o diafragmas entre los cajones. En las ubicaciones de los diafragmas o marcos transversales externos deberá haber arriostramiento dentro de los cajones para recibir las fuerzas del arriostramiento externo.

Si se coloca un diafragma tipo placa por motivos de continuidad o para resistir las fuerzas de torsión generadas por los elementos estructurales, éste se deberá conectar a las almas y alas de la sección tipo cajón.

En los diafragmas intermedios internos se deberían proveer bocas de acceso, las cuales deberían ser tan grandes como resulte posible. Se debería investigar el efecto de las bocas de acceso sobre las tensiones en los diafragmas a fin de determinar si es necesario utilizar refuerzos.

Se deberán proveer diafragmas o marcos transversales intermedios. Para las vigas de cajón simple y para los cajones en secciones transversales de puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son totalmente efectivas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1, la separación del arriostramiento interno se deberá elegir de manera de controlar la distorsión de la sección transversal y nunca deberá ser mayor que 9000 mm.

Para las secciones de cajón simple y para secciones de múltiples cajones en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son totalmente efectivas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1, se deberá considerar la necesidad de proveer un elemento transversal inferior dentro del arriostramiento interno. Cuando sea provisto, este elemento transversal se deberá conectar al ala del cajón a menos que se utilicen rigidizadores de ala longitudinales, en cuyo caso el elemento transversal se deberá abulonar a los rigidizadores longitudinales. El área de la sección transversal y la rigidez de los elementos de arriostramiento interno superiores e inferiores tampoco deberán ser menores que el área y la

C6.7.4.3

Debido al número de puntos de carga y complejidad de los detalles alrededor de las bocas de acceso, en general es aconsejable analizar detalladamente los diafragmas internos en los apoyos. Se deberían evaluar las tensiones principales en los diafragmas internos y también en los diafragmas externos con relaciones de aspecto (relaciones entre longitud y profundidad) mayores que 4.0. Es posible que el Ingeniero también desee considerar la magnitud de la tensión principal de tracción bajo la carga de fatiga mayorada, la cual puede determinar que no sea posible utilizar en el diafragma ciertos detalles sensibles a la fatiga.

Generalmente no se requiere arriostramiento externo salvo en los puntos de apoyo. Si el análisis indica que los cajones rotarán excesivamente cuando se coloque el tablero de hormigón, se pueden colocar riostras externas temporarias sin pintar. Sin embargo, siempre será necesario considerar el efecto del retiro de cualquier arriostramiento temporario. Retirar el arriostramiento tiende a provocar un aumento de las tensiones en el tablero de hormigón.

Se requiere arriostramiento interno para estabilizar las alas superiores de las secciones tipo omega invertida en compresión cuando se coloca el tablero de hormigón. Sin embargo, para restringir la sección transversal y que ésta permanezca plana y proporcionar la estabilidad necesaria se le debe proveer un arriostramiento longitudinal adicional a la viga desde los apoyos o el arriostramiento lateral superior. El arriostramiento interno también ayuda a mantener la forma del cajón u omega invertida. Se ha demostrado que en los cajones que forman parte de secciones transversales de puentes que satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 y con alas totalmente efectivas, las tensiones transversales de flexión y las tensiones longitudinales de alabeo debidas a la distorsión de la sección transversal son pequeñas (*Johnston y Mattock 1967*) y habitualmente se las desprecia. Por lo tanto, se puede considerar reducir el número de elementos de arriostramiento interno permanentes tomando en cuenta que como mínimo se deberían colocar elementos de arriostramiento interno en los puntos de máximo momento en el tramo y adyacentes a los empalmes realizados en obra. También puede ser necesario colocar elementos de arriostramiento interno adicionales temporarios o permanentes durante las etapas de transporte y construcción y en los puntos de izaje de las piezas.

Para las secciones de cajón simple y para las secciones tipo cajón en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son completamente

rigidez de los elementos diagonales.

efectivas, la mejor manera de controlar las tensiones de distorsión consiste en introducir diafragmas o marcos transversales internos. En este tipo de cajones los elementos de arriostramiento internos se debe separar de manera de limitar las tensiones transversales de flexión debidas a las cargas mayoradas a 135 MPa en el Estado Límite de Resistencia, tal como lo requiere el Artículo 6.11.1.1. Además, la separación de los elementos de arriostramiento internos debería limitar las tensiones longitudinales de alabeo debidas a las cargas mayoradas a aproximadamente 10 por ciento de las tensiones debidas a la flexión respecto del eje mayor en el Estado Límite de Resistencia; la separación de estos elementos nunca debe ser mayor que 9000 mm. Si se considera que la torsión de Saint-Venant es significativa se debería considerar proveer elementos de arriostramiento transversales en el fondo del cajón u omega invertida como parte del arriostramiento interior a fin de asegurar que la sección transversal conserve su forma. En estos casos los elementos de arriostramiento transversal inferiores se deberían conectar al ala o a los rigidizadores de ala longitudinales para controlar mejor la distorsión transversal del ala de la sección tipo cajón. En el caso de las secciones tipo cajón cerradas, los elementos de arriostramiento transversal superiores se deberían conectar de manera similar. Si la distorsión de la sección es controlada adecuadamente por los elementos de arriostramiento internos, actuando conjuntamente con un sistema de arriostramiento lateral superior en el caso de las secciones tipo omega invertida, la inercia torsional, J , de una sección tipo cajón se puede determinar como:

$$J = 4 \frac{A_o^2}{\sum_t \frac{b}{t}} \quad (\text{C6.7.4.3-1})$$

donde:

A_o = área encerrada por la sección tipo cajón (mm²)

b = ancho del elemento rectangular (mm)

t = espesor de la palca (mm)

En las secciones tipo omega invertida con almas inclinadas puede ser necesario utilizar marcos transversales, diafragmas o puntales intermedios adicionales para reducir la flexión lateral que provoca en las alas superiores con arriostramiento discreto una carga transversal uniformemente distribuida actuando sobre las alas. Esta carga es el resultado de la variación de la componente horizontal del corte en el ala debido a la carga permanente más la variación del corte por torsión debido a la carga permanente por unidad de longitud del elemento, y se

discute en mayor profundidad en el Artículo C6.11.3.2.

La conexión de las placas de unión de los marcos transversales internos a las alas de las secciones tipo cajón se discute en mayor profundidad en el Artículo C6.6.1.3.1.

6.7.4.4 Celosías y arcos

Se deberán proveer diafragmas en las uniones a las vigas de tablero y en otras uniones o puntos de aplicación de cargas concentradas. También se podrán proveer diafragmas internos para mantener la alineación de los elementos.

Las placas de empalme donde se conecte un pasador tipo pedestal en el extremo de una celosía se deberán conectar mediante un diafragma. Siempre que resulte posible las almas del pedestal se deberían conectar mediante un diafragma.

Si el extremo de la placa de alma o el cubrejuntas se encuentra a una distancia mayor o igual que 1200 mm del punto de intersección de los elementos, se deberá proveer un diafragma entre las placas de empalme donde se conectan los elementos principales.

6.7.5 Arriostramiento lateral

6.7.5.1 Disposiciones generales

La necesidad de utilizar arriostramiento lateral se deberá investigar para todas las etapas correspondientes a los procedimientos constructivos supuestos y también para la condición final.

Cuando sea requerido, se deberá colocar arriostramiento lateral ya sea en o cerca del plano de un ala o cuerda arriostrada. La investigación para determinar si se requiere arriostramiento lateral debería incluir pero no limitarse a lo siguiente:

- Transferencia de cargas de viento laterales a los apoyos como se especifica en el Artículo 4.6.2.7,
- Transferencia de cargas laterales como se especifica en el Artículo 4.6.2.8, y
- Control de las deformaciones durante la fabricación, el montaje y la colocación del tablero.

El arriostramiento lateral requerido para condiciones que no sean la condición final se podrá retirar.

Si el modelo estructural usado para determinar las solicitaciones incluye arriostramiento lateral permanente, éste se deberá diseñar para todos los estados límites aplicables. Se deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.8.4 y 6.9.3.

Las placas de unión para los arriostramientos laterales deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.6.1.3.2.

Cuando el arriostramiento lateral se diseñe para cargas sísmicas se deberán satisfacer los requisitos del Artículo 4.6.2.8.

6.7.5.2 Secciones doble Te rectas

Cuando sea requerido, el arriostramiento lateral se deberá colocar en los vanos exteriores. Las alas que estén unidas a tableros cuya rigidez sea suficiente para arriostrar el ala no requerirán arriostramiento lateral.

Se deberá investigar la necesidad de utilizar arriostramiento lateral en las regiones de momento negativo de las vigas continuas por motivos de estabilidad durante el montaje.

6.7.5.3 Secciones tipo omega invertida rectas

Se deberá proveer arriostramiento lateral superior entre las alas de las secciones tipo omega invertida individuales. Se deberá investigar la necesidad de utilizar un sistema de arriostramiento lateral en la totalidad de la longitud del elemento para asegurar que las deformaciones de la sección sean controladas adecuadamente tanto durante el montaje como durante la colocación del tablero de hormigón. Si no se provee un sistema de arriostramiento lateral en la totalidad de la longitud del elemento, se deberá investigar la estabilidad local de las alas superiores y la estabilidad global de las secciones tipo omega invertida individuales para el método constructivo supuesto por el Ingeniero.

C6.7.5.2

En las secciones doble Te las tensiones debidas a las cargas de viento se pueden reducir:

- Modificando el tamaño de las alas,
- Reduciendo la separación entre diafragmas o marcos transversales, o
- Agregando arriostramiento lateral.

Se debería investigar la economía relativa de cada uno de estos métodos.

C6.7.5.3

En general el resultado de la investigación será que entre múltiples secciones tipo omega invertida individuales no se requiere arriostramiento lateral.

Además de proveer rigidez torsional a una sección tipo omega invertida abierta y resistir el flujo de corte antes que el tablero de hormigón se endurezca o se vuelva compuesto, los elementos de arriostramiento lateral superiores también están sujetos a esfuerzos significativos debido a la flexión de la omega invertida no compuesta. En ausencia de un análisis más refinado, Fan y Helwig (1990) presentan un enfoque para estimar estos esfuerzos.

Para las secciones tipo omega invertida rectas con tramos de menos de aproximadamente 45 750 mm, como mínimo se debería proveer un panel de arriostramiento lateral horizontal dentro de la omega invertida a cada lado de los puntos de izaje. Se debería considerar la necesidad de utilizar arriostramiento lateral adicional para resistir el flujo de corte resultante de cualquier par torsor neto que actúe sobre la sección de acero por las cargas desiguales debidas al peso del tablero actuando a cada lado de las alas superiores, o a cualquier otra carga excéntrica conocida que actúe sobre la sección de acero durante la construcción. Si no se provee un sistema de arriostramiento en la totalidad de la longitud, el Ingeniero deberá garantizar la estabilidad durante las diferentes etapas constructivas supuestas. Para las secciones tipo omega invertida rectas con tramos de más de aproximadamente 45 750 mm, dentro de la omega invertida se debería proveer un sistema de arriostramiento lateral en toda la longitud del elemento. Este sistema ayudará a limitar las distorsiones que provocan los cambios

de temperatura que ocurren antes de la colocación del tablero de hormigón y resistirá la torsión provocada por cualquier carga excéntrica que actúe sobre la sección de acero durante la construcción.

Debido a que requieren fabricar menos piezas y armar menos uniones, se prefieren los sistemas de arriostramiento lateral superiores de diagonal única antes que los sistemas en cruz.

Debido a que generalmente el tablero de hormigón es más rígido que el arriostramiento lateral superior, el arriostramiento es menos efectivo una vez que el tablero se endurece o se vuelve compuesto. Para determinar el corte que resistirá el arriostramiento una vez que el tablero se vuelva efectivo se puede comparar la rigidez al corte del tablero con la del arriostramiento.

El arriostramiento lateral superior debería ser continuo sobre los empalmes realizados en obra.

El arriostramiento lateral superior se deberá diseñar para resistir el flujo de corte en la sección debido a las cargas mayoradas antes que el tablero de hormigón se endurezca o se vuelva efectivo. También se deberán considerar las fuerzas en el arriostramiento debidas a la flexión de la omega invertida.

Si el arriostramiento está unido a las almas, el área de la sección transversal de la omega invertida para flujo de corte se deberá reducir de manera de reflejar la ubicación real del arriostramiento, y se deberán proveer medios para transmitir las fuerzas de arriostramiento al ala superior.

6.7.5.4 Celosías

Los puentes de celosía con tablero inferior o superior deberán tener arriostramiento lateral superior e inferior. Si se utiliza un sistema de arriostramiento en cruz, cada elemento se podrá considerar efectivo simultáneamente si los elementos satisfacen los requisitos de esbeltez tanto para elementos traccionados como para elementos comprimidos.

El elemento que provee arriostramiento lateral a los cordones comprimidos debería ser tan profundo como sea posible y estar conectado a ambas alas.

Las uniones a las vigas de tablero deberían estar ubicadas de manera que el sistema de arriostramiento lateral abarque tanto la viga de tablero como los elementos de apoyo principales. En las ubicaciones donde el sistema de arriostramiento lateral interseque una unión formada por una viga de tablero y un elemento longitudinal principal, el elemento lateral se deberá conectar a ambos elementos.

6.7.6 Pasadores

6.7.6.1 Ubicación

Los pasadores se deberían ubicar de manera de

minimizar las solicitaciones debidas a la excentricidad.

6.7.6.2 Resistencia

6.7.6.2.1 Combinación de flexión y corte

C6.7.6.2.1

Los pasadores sujetos a una combinación de flexión y corte se deberán dimensionar de manera que satisfagan:

El desarrollo de la Ecuación 1 se discute en el trabajo de Kulicki (1983).

$$\frac{6.0M_u}{\phi_f D^3 F_y} + \left(\frac{2.2V_u}{\phi_v D^2 F_y} \right)^3 \leq 0.95 \quad (6.7.6.2.1-1)$$

donde:

D = diámetro del perno (mm)

M_u = momento debido a las cargas mayoradas (N-mm)

V_u = corte debido a las cargas mayoradas (N)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del pasador (MPa)

ϕ_f = factor de resistencia para flexión como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

ϕ_v = factor de resistencia para corte como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

El momento, M_u , y el corte, V_u , se deberían tomar en la misma sección de diseño sobre el pasador.

6.7.6.2.2 Aplastamiento

La resistencia mayorada al aplastamiento sobre pasadores se deberá tomar como:

$$(R_{pB})_r = \phi_b (R_{pB})_n \quad (6.7.6.2.2-1)$$

donde:

$$(R_{pB})_n = 1.5 t D F_y \quad (6.7.6.2.2-2)$$

y donde:

t = espesor de la placa (mm)

D = diámetro del pasador (mm)

ϕ_b = factor de resistencia para aplastamiento como se

especifica en el Artículo 6.5.4.2

6.7.6.3 Mínimo tamaño de pasador para las barras de ojo

El diámetro del pasador, D , deberá satisfacer:

$$D \geq \left(\frac{3}{4} + \frac{F_y}{2760} \right) b \quad (6.7.6.3-1)$$

donde:

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del pasador (MPa)

b = ancho del cuerpo de la barra de ojo (mm)

6.7.6.4 Pasadores y tuercas para pasadores

Los pasadores deberán tener una longitud suficiente para asegurar que todas las partes conectadas se apoyen completamente sobre el cuerpo del pasador. El pasador se deberá asegurar en su sitio mediante:

- Tuercas hexagonales rebajadas,
- Tuercas macizas hexagonales con arandelas, o
- Si los pasadores tienen orificios pasantes, un elemento pasante con un sistema de traba con varillas.

Las tuercas para pasadores o varillas deberán ser de fundición o acero y se deberán asegurar correctamente en su posición. Esto se podrá lograr usando chavetas, arandelas especiales o contratuercas disponibles comercialmente.

6.8 ELEMENTOS TRACCIONADOS

6.8.1 Disposiciones generales

Los elementos y empalmes sujetos a tracción axial se deberán investigar para:

- Fluencia en la sección bruta, por ejemplo la Ec. 6.8.2.1-1 y
- Fractura en la sección neta, por ejemplo la Ec. 6.8.2.1-2.

Para determinar la sección bruta se deberán considerar todos los orificios mayores que los típicamente utilizados para instalar conectores tales como bulones.

Para determinar la sección neta se deberá considerar:

C6.8.1

Los orificios que típicamente se deducen al determinar la sección bruta incluyen los orificios para colocación de pasadores, las bocas de acceso y las perforaciones.

- El área bruta a partir de la cual se harán las deducciones o a la cual se aplicarán los factores de reducción, según corresponda;
- Deducciones para todos los orificios en la sección transversal de diseño;
- La corrección de las deducciones de los orificios para bulones de acuerdo con la regla para sujetadores alternados especificada en el Artículo 6.8.3;
- La aplicación del factor de reducción U especificado en el Artículo 6.8.2.2 para los elementos y en el Artículo 6.13.5.2 para las platabandas y otros elementos de empalme para considerar el retraso del corte; y
- La aplicación del factor de eficiencia correspondiente a área máxima de 85% para las platabandas y otros elementos de empalme especificados en el Artículo 6.13.5.2.

Los elementos traccionados deberán satisfacer los requisitos de esbeltez especificados en el Artículo 6.8.4 y los requisitos para fatiga del Artículo 6.6.1. En las conexiones de los extremos se deberá investigar la resistencia a la rotura de bloque de corte como se especifica en el Artículo 6.13.4.

6.8.2 Resistencia a la tracción

6.8.2.1 Disposiciones generales

La resistencia mayorada a la tracción axial, P_r , se deberá tomar como igual al menor de los valores obtenidos de las Ecuaciones 1 y 2.

$$P_r = \phi_y P_{ny} = \phi_y F_y A_g \quad (6.8.2.1-1)$$

$$P_r = \phi_u P_{nu} = \phi_u F_u A_n U \quad (6.8.2.1-2)$$

donde:

P_{ny} = resistencia nominal a la tracción para fluencia en la sección bruta (N)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada (MPa)

A_g = área bruta de la sección transversal del elemento (mm^2)

P_{nu} = resistencia nominal a la tracción para fractura en la sección neta (N)

Para diseñar elementos traccionados de sección transversal uniformemente variable se pueden utilizar los requisitos de AISC (1999).

C6.8.2.1

El factor de reducción, U , no se aplica para verificar la fluencia en la sección bruta, ya que la fluencia tiende a igualar las tensiones de tracción no uniformes que el retraso del corte provoca en la sección transversal.

Debido al endurecimiento por deformación, antes de llegar a la fractura un elemento de acero dúctil cargado en tracción axial puede resistir una fuerza mayor que el producto entre su sección bruta y su resistencia a la fluencia. Sin embargo, el alargamiento excesivo debido a la fluencia descontrolada del área bruta no sólo señala el límite de utilidad del elemento sino que también puede precipitar la falla del sistema estructural del cual forma parte. Dependiendo de la relación entre el área neta y el área bruta y de las propiedades mecánicas del acero, el componente puede sufrir fractura por falla del área neta a una carga menor que la requerida para que el área bruta entre en fluencia. Tanto la fluencia general del área bruta como la fractura del área neta constituyen medidas de la resistencia del componente. Los valores relativos de los factores de resistencia para fluencia y fractura reflejan los diferentes índices de confiabilidad que se consideran

F_u = resistencia a la tracción (MPa)

A_n = área neta del elemento como se especifica en el Artículo 6.8.3 (mm²)

U = factor de reducción que considera el retraso del corte;
 $U = 1.0$ para componentes en los cuales las solicitaciones se transmiten a todos los elementos; para todos los demás casos U es como se especifica en el Artículo 6.8.2.2

ϕ_y = factor de resistencia para fluencia de los elementos traccionados como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

ϕ_u = factor de resistencia para fractura de los elementos traccionados como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

6.8.2.2 Factor de reducción, U

En ausencia de un análisis más refinado o ensayos, para tomar en cuenta el retraso del corte se podrán utilizar los factores de reducción aquí especificados.

Para las secciones solicitadas por una carga de tracción transmitida directamente a cada uno de los elementos de la sección transversal por medio de bulones o soldaduras el factor de reducción, U , se podrá tomar como:

$$U = 1.0$$

Para las uniones abulonadas se podrán utilizar los siguientes valores de U :

- Para perfiles doble T laminados cuyos anchos de ala sean mayores o iguales que dos tercios de su profundidad, y las T estructurales cortadas a partir de dichos perfiles, siempre que la unión sea a las alas y que en la dirección de la tensión no haya menos de tres sujetadores en cada línea:

$$U = 0.90$$

- Para todos los demás elementos que en la dirección de la tensión no tengan menos de tres sujetadores en cada línea:

$$U = 0.85$$

- Para todos los elementos que en la dirección de la tensión tengan solamente dos sujetadores en cada línea:

$$U = 0.75$$

Cuando una carga de tracción sea transmitida mediante soldaduras de filete a algunos pero no a todos los elementos de una sección transversal, la resistencia de la soldadura

adecuados para los dos modos de falla.

Generalmente la longitud de la parte del componente que ocupa el área neta en los orificios para sujetadores es despreciable en comparación con la longitud total del elemento. En consecuencia, el endurecimiento por deformación se produce rápidamente y por lo tanto la fluencia del área neta en los orificios para sujetadores no constituye un límite de resistencia de significación práctica, excepto tal vez para algunos elementos armados de proporciones poco habituales.

Para las uniones soldadas, A_n es la sección bruta menos cualquier boca de acceso que hubiera en la zona de unión.

C6.8.2.2

Los requisitos del Artículo 6.8.2.2 se adaptaron a partir del Comentario a la Especificación AISC para LRFD de 1999, Artículo B3, Área Neta Efectiva para Elementos Traccionados. También hay requisitos similares en ediciones de la Especificación AISC para LRFD anteriores a 1993, pero en 1993 éstos fueron reemplazados por una ecuación más precisa a utilizar para determinar los efectos del retraso del corte – la Ecuación B3-3. El Comentario a la Especificación de 1999 sugiere que la complicación y exactitud de la Ecuación B3-3 no justifican su uso en el diseño.

será determinante.

6.8.2.3 Combinación de tracción y flexión

Un componente solicitado a tracción y flexión deberá satisfacer las Ecuaciones 1 o 2:

$$\text{Si } \frac{P_u}{P_r} < 2, \text{ entonces} \quad (6.8.2.3-1)$$

$$\frac{P_u}{2.0P_r} + \left(\frac{M_{ux}}{M_{rx}} + \frac{M_{uy}}{M_{ry}} \right) \leq 1.0$$

$$\text{Si } \frac{P_u}{P_r} \geq 2, \text{ entonces} \quad (6.8.2.3-2)$$

$$\frac{P_u}{P_r} + \frac{8.0}{9.0} \left(\frac{M_{ux}}{M_{rx}} + \frac{M_{uy}}{M_{ry}} \right) \leq 1.0$$

donde:

P_r = resistencia mayorada a la tracción como se especifica en el Artículo 6.8.2.1 (N)

M_{rx} = resistencia mayorada a la flexión respecto del eje x, tomada como ϕ_f por la resistencia nominal a la flexión respecto del eje x determinada como se especifica en los Artículos 6.10, 6.11 o 6.12, según corresponda (N-mm)

M_{ry} = resistencia mayorada a la flexión respecto del eje y, tomada como ϕ_f por la resistencia nominal a la flexión respecto del eje y determinada como se especifica en el Artículo 6.12, según corresponda (N-mm)

M_{ux}, M_{uy} = momentos flectores debidos a las cargas mayoradas respecto de los ejes x e y, respectivamente (N-mm)

P_u = solicitación axial debida a las cargas mayoradas (N)

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

Si debido a la combinación de tracción y flexión un ala está solicitada por una tensión neta de compresión, se deberá investigar su estabilidad para determinar si hay pandeo local.

C6.8.2.3

Las ecuaciones de interacción para elementos traccionados y comprimidos son simplificaciones que se utilizan para el diseño. Las ecuaciones de este tipo que para las relaciones de momento involucran exponentes iguales a 1.0 en general son conservadoras. Para lograr mayor exactitud se pueden utilizar curvas de interacción no lineal, las cuales se discuten en Galambos (1998). Si se utilizan estas ecuaciones de interacción será necesario investigar además las tensiones en Estado Límite de Servicio para evitar la fluencia prematura.

Para las secciones en las cuales la resistencia nominal a la flexión respecto del eje x se expresa en términos de la tensión, la resistencia a la flexión mayorada respecto del eje x en las Ecuaciones 1 y 2 se debería tomar como:

$$M_{rx} = \text{menor valor entre } \phi_f F_{nc} S_{xc} \text{ y } \phi_f F_{nt} S_{xt} \quad (C6.8.2.3-1)$$

donde:

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión del ala de compresión (MPa)

F_{nt} = resistencia nominal a la flexión del ala de tracción (MPa)

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm³)

S_{xt} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} (mm³)

S_{xc} y S_{xt} se definen de esta manera como valores equivalentes que toman en cuenta los efectos combinados de las cargas que actúan sobre diferentes secciones en los elementos compuestos.

Para las secciones en las cuales la resistencia nominal a la flexión respecto del eje x se determina de acuerdo con los requisitos del Apéndice A, la resistencia a la flexión

mayorada respecto del eje x se debería tomar como:

$$M_{rx} = \text{menor valor entre } \phi_f M_{nc} \text{ y } \phi_f M_{nt} \quad (\text{C6.8.2.3-2})$$

donde:

M_{nc} = resistencia nominal a la flexión en base al ala de compresión (N-mm)

M_{nt} = resistencia nominal a la flexión en base al ala de tracción (N-mm)

Para las secciones en forma de doble T y H, la resistencia nominal a la flexión respecto del eje y se determina de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.12.2.2.1.

6.8.3 Área neta

El área neta, A_n , de un elemento es igual al producto entre el espesor del elemento y su menor ancho neto. El área neta, A_n , de un elemento es igual a la sumatoria de las áreas netas de cada uno de sus componentes. El ancho deducido para todos los orificios – normales, holgados y ovalados – se deberá tomar 2mm mayor que el tamaño de orificio especificado en el Artículo 6.13.2.4.2. Se deberá determinar el ancho neto para cada cadena de orificios que se extienda a través del elemento o componente a lo largo de cualquier línea transversal, diagonal o en zigzag.

El ancho neto de cada cadena se deberá determinar restando del ancho del elemento la sumatoria de los anchos de todos los orificios que haya en la cadena y sumando la cantidad $s^2/4g$ por cada espacio entre orificios consecutivos de la cadena, siendo:

s = separación de dos orificios consecutivos cualesquiera en la dirección de la carga (mm)

g = separación de los mismos dos orificios perpendicular a la dirección de la carga (mm)

Para los ángulos simples, el valor de g en ramas adyacentes opuestas deberá ser la sumatoria de las g medidas desde la parte posterior de los ángulos menos el espesor.

6.8.4 Relación de esbeltez límite

A excepción de las varillas, barras de ojo, cables y placas, los elementos solicitados a tracción deberán

C6.8.3

La norma métrica para bulones establece que el tamaño de los orificios normales debe ser 2 mm mayor que el diámetro del bulón si el diámetro del bulón es menor o igual que 24 mm, o bien 3 mm mayor que el diámetro del bulón si éste es mayor que 24 mm. Por lo tanto, utilizar un incremento constante de 3.2 mm cualquiera sea el diámetro del bulón no es una solución adecuada. Además, como la menor lectura que se puede realizar usando una regla o cinta métrica es de un milímetro, la deducción debería ser de 2 mm y no de 1.6 mm (conversión matemática directa).

El desarrollo de la regla de " $s^2/4g$ " para estimar el efecto de una cadena de orificios sobre la resistencia a la tracción de una sección ha sido descrito por McGuire (1968). Aunque presenta algunas deficiencias teóricas, esta regla ha estado en uso durante mucho tiempo y ha resultado ser adecuada para las uniones habituales.

Al diseñar un elemento a tracción una práctica conservadora y conveniente consiste en utilizar el menor ancho neto correspondiente a cualquier cadena combinado con la fuerza de tracción total que actúa en el elemento. Algunas veces es posible lograr un diseño aceptable aunque levemente menos conservador verificando cada una de las cadenas posibles con una fuerza de tracción obtenida restando la fuerza que toma cada bulón ubicado delante de dicha cadena (es decir, de los bulones que se encuentran más próximos a la mitad de la longitud del elemento) de la totalidad de la fuerza de tracción que actúa en el elemento. Este enfoque supone que la totalidad de la fuerza es transmitida igualmente por todos los bulones en un extremo.

satisfacer los requisitos de esbeltez especificados a continuación:

- Para elementos principales sujetos a inversiones de la tensión $\frac{\ell}{r} \leq 140$
- Para elementos principales no sujetos a inversiones de la tensión $\frac{\ell}{r} \leq 200$
- Para elementos de arriostramiento $\frac{\ell}{r} \leq 240$

donde:

ℓ = longitud no arriostrada (mm)
 r = mínimo radio de giro (mm)

6.8.5 Elementos armados

6.8.5.1 Disposiciones generales

Los elementos principales de los elementos traccionados armados a partir de perfiles laminados o soldados se deberán conectar mediante placas continuas con o sin perforaciones o bien mediante placas de unión con o sin enlazado. Las uniones soldadas entre los perfiles y las placas deberán ser continuas. Las uniones abulonadas entre los perfiles y las placas deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.13.2.

6.8.5.2 Placas perforadas

La relación entre la longitud de los orificios en la dirección de la tensión y su ancho no deberá ser mayor que 2.0.

La distancia libre entre orificios en la dirección de la tensión no deberá ser menor que la distancia transversal entre la línea más próxima de bulones o soldaduras de unión. La distancia libre entre el extremo de la placa y el primer orificio no deberá ser menor que 1.25 veces la distancia transversal entre bulones o soldaduras.

La periferia de los orificios deberá tener un radio mínimo de 38 mm.

Se podrá asumir que los anchos sin apoyo en los bordes de los orificios contribuyen al área neta del elemento. Si los orificios están alternados en placas perforadas opuestas, el área neta del elemento se deberá considerar igual que para una sección con orificios en el mismo plano transversal.

6.8.6 Barras de ojo

6.8.6.1 Resistencia mayorada

C6.8.5.1

En la actualidad para los elementos armados se utilizan casi exclusivamente placas perforadas en lugar de placas de unión y/o enlazado. Sin embargo, cuando circunstancias especiales lo justifiquen, se podrán utilizar placas de unión con o sin enlazado. AASHTO (2002) y AISC (1999) indican dimensiones límite para el diseño.

C6.8.6.1

La resistencia mayorada del cuerpo de la barra de ojo se deberá tomar como se especifica en la Ecuación 6.8.2.1-1.

6.8.6.2 Dimensiones

Las barras de ojo deberán tener un espesor uniforme no menor que 14 mm y no mayor que 50 mm.

El radio de transición entre la cabeza y el cuerpo de una barra de ojo no deberá ser menor que el ancho de la cabeza en el eje del orificio para el pasador.

El ancho neto de la cabeza en el eje del orificio para el pasador no deberá ser menor que 135 por ciento del ancho requerido para el cuerpo.

La dimensión neta de la cabeza más allá del orificio para el pasador, tomada en dirección longitudinal, no deberá ser menor que 75 por ciento del ancho del cuerpo.

El ancho del cuerpo no deberá ser mayor que ocho veces su espesor.

El centro del orificio para el pasador deberá estar ubicado sobre el eje longitudinal del cuerpo de la barra. El diámetro del orificio para el pasador no deberá ser más que 0.8 mm mayor que el diámetro del pasador.

Para los aceros cuya resistencia a la fluencia mínima especificada es mayor que 485 MPa, el diámetro del orificio no deberá ser mayor que cinco veces el espesor de la barra.

6.8.6.3 Paquetes de barras de ojo

Las barras de ojo que forman un conjunto deberán ser simétricas respecto del plano central del elemento y tan paralelas como sea posible. Deberán estar restringidas para evitar su desplazamiento lateral sobre los pasadores y su deformación lateral debida a la oblicuidad del puente.

Las barras de ojo deberán estar dispuestas de manera tal que las barras adyacentes en un mismo panel tengan una separación mínima de al menos 14 mm. Se deberán proveer anillos separadores para llenar cualquier luz entre barras adyacentes sobre un mismo pasador. Las barras diagonales que se intersequen y que no estén lo suficientemente separadas como para mantenerse separadas una de otra en todo momento se deberán unir en la intersección mediante abrazaderas.

6.8.7 Placas conectadas mediante pasadores

6.8.7.1 Disposiciones generales

Siempre que sea posible se deberán evitar las placas

La Ecuación 6.8.2.1-2 no es determinante debido a que la sección neta en la cabeza es como mínimo 1.35 mayor que la sección en el cuerpo.

C6.8.6.2

La limitación referente al diámetro del orificio para aceros con una resistencia a la fluencia mínima especificada mayor que 485 MPa, la cual no aparece en las Especificaciones Estándares AASHTO, pretende evitar que se generen concavidades más allá del orificio para el pasador (*AISC 1999*).

C6.8.6.3

El conjunto de barras de ojos se debería detallar de manera de evitar que en las juntas ingresen materiales que puedan inducir la corrosión.

Algunas veces estas barras vibran de manera perpendicular a su propio plano. La intención de este requisito es evitar el contacto repetido entre barras, ya sea proveyendo suficiente espacio entre las mismas o mediante el uso de abrazaderas.

conectadas mediante pasadores.

Se deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.8.2.1.

6.8.7.2 Placas para pasadores

La resistencia mayorada al aplastamiento en las placas para pasadores, P_r , se deberá tomar como:

$$P_r = \phi_b P_n = \phi_b A_b F_y \quad (6.8.7.2-1)$$

donde:

P_n = resistencia nominal al aplastamiento (N)

A_b = área de apoyo proyectada sobre la placa (mm^2)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada de la placa (MPa)

ϕ_b = factor de resistencia para aplastamiento como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

La placa principal se puede reforzar en la zona del orificio usando placas para pasadores de manera de aumentar el espesor de la placa principal.

Si se utilizan placas para pasadores, éstas se deberán disponer de manera de minimizar la excentricidad de la carga y se deberán unir a la placa principal mediante soldaduras o bulones suficientes para transmitir las fuerzas de aplastamiento de las placas para pasadores a la placa principal.

6.8.7.3 Dimensiones

El área neta combinada de la placa principal más las placas para pasadores en una sección transversal que atraviese el eje del orificio para el pasador no deberá ser menor que 1.4 veces el área neta requerida para la placa principal lejos del orificio.

El área combinada de la placa principal más las placas para pasadores más allá del orificio para el pasador tomada en una dirección longitudinal no deberá ser menor que el área neta requerida para la placa principal lejos del orificio.

El centro del orificio para el pasador deberá estar ubicado sobre el eje longitudinal de la placa principal. El diámetro del orificio para el pasador no deberá ser más que 0.8 mm mayor que el diámetro del pasador.

Para los aceros cuya resistencia a la fluencia mínima especificada es mayor que 485 MPa, el diámetro del orificio no deberá ser mayor que cinco veces el espesor combinado de la placa principal más las placas para pasadores.

El espesor combinado de la placa principal más las placas para pasadores no deberá ser menor que 12 por

C6.8.7.3

Las dimensiones especificadas en este artículo aseguran que el elemento no fallará en la zona del orificio si en la placa principal, lejos del orificio, se satisface el Estado Límite de Resistencia.

ciento del ancho neto desde el borde del orificio hasta el borde de la placa o las placas. El espesor de la placa principal no deberá ser menor que 12 por ciento del ancho requerido lejos del orificio.

6.8.7.4 Paquetes

Los elementos conectados mediante pasadores deberán estar restringidos para evitar su desplazamiento lateral sobre el pasador y su deformación lateral debida a la oblicuidad del puente.

6.9 ELEMENTOS COMPRIMIDOS

6.9.1 Disposiciones generales

Los requisitos de este artículo se aplican a los elementos de acero prismáticos compuestos y no compuestos que tengan al menos un plano de simetría y solicitados ya sea a compresión axial o a una combinación de compresión axial y flexión respecto de un eje de simetría.

Los arcos también deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.14.4.

Los cordones comprimidos de los puentes de armadura rebajada también deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.14.2.9.

6.9.2 Resistencia a la compresión

6.9.2.1 Compresión axial

La resistencia mayorada de los componentes en compresión, P_r , se deberá tomar como:

$$P_r = \phi_c P_n \quad (6.9.2.1-1)$$

donde:

P_n = resistencia nominal a la compresión como se especifica en los Artículos 6.9.4 o 6.9.5, según corresponda (N)

ϕ_c = factor de resistencia para compresión como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

6.9.2.2 Combinación de compresión axial y flexión

La carga de compresión axial, P_u , y los momentos concurrentes, M_{ux} y M_{uy} , calculados para las cargas mayoradas de acuerdo con métodos analíticos elásticos

C6.8.7.4

El conjunto conectado mediante pasadores se debería detallar de manera de evitar que en las juntas ingresen materiales que puedan inducir la corrosión

C6.9.1

Las fórmulas convencionales para el diseño de columnas contienen tolerancias para considerar las imperfecciones y excentricidades admisibles en los procesos de fabricación y montaje habituales. Si al diseñar el puente se conoce alguna otra excentricidad significativa se deberían considerar sus efectos.

Se debería investigar el pandeo torsional o el pandeo flexo-torsional de los elementos comprimidos de simetría simple o no simétricos y de los elementos comprimidos de simetría doble de paredes de muy poco espesor. Para diseñar elementos comprimidos de sección transversal uniformemente variable se pueden utilizar los requisitos de AISC (1999).

C6.9.2.2

Estas ecuaciones son idénticas a los requisitos de AISC (1999). Fueron seleccionadas para su inclusión en dicha Especificación luego de ser comparadas junto con varias

deberán satisfacer la siguiente relación:

- Si $\frac{P_u}{P_y} < 0.2$, entonces:

$$\frac{P_u}{2.0P_r} + \left(\frac{M_{ux}}{M_{rx}} + \frac{M_{uy}}{M_{ry}} \right) \leq 1.0 \quad (6.9.2.2-1)$$

- Si $\frac{P_u}{P_y} \geq 0.2$, entonces:

$$\frac{P_u}{P_r} + \frac{8.0}{9.0} \left(\frac{M_{ux}}{M_{rx}} + \frac{M_{uy}}{M_{ry}} \right) \leq 1.0 \quad (6.9.2.2-2)$$

donde:

P_r = resistencia mayorada a la compresión como se especifica en el Artículo 6.9.2.1 (N)

M_{rx} = resistencia mayorada a la flexión respecto del eje x, tomada como ϕ_f por la resistencia nominal a la flexión respecto del eje x determinada como se especifica en los Artículos 6.10, 6.11 o 6.12, según corresponda (N-mm)

M_{ry} = resistencia mayorada a la flexión respecto del eje y, tomada como ϕ_f por la resistencia nominal a la flexión respecto del eje y determinada como se especifica en el Artículo 6.12, según corresponda (N-mm)

M_{ux} = momento flector mayorado respecto del eje x calculado como se especifica a continuación (N-mm)

M_{uy} = momento flector mayorado respecto del eje y calculado como se especifica a continuación (N-mm)

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

Los momentos respecto de los ejes de simetría, M_{ux} y M_{uy} , se pueden determinar mediante:

- Un análisis elástico de segundo orden que tome en cuenta la amplificación de momentos que provoca la carga axial mayorada, o
- El método aproximado especificado en el Artículo 4.5.3.2.2b.

formulaciones alternativas contra los resultados de análisis inelásticos refinados de 82 casos de desplazamiento lateral en pórticos (Kanchanalai 1977). P_u , M_{ux} y M_{uy} son las solicitaciones axiales y flexionales simultáneas que actúan en una sección transversal debido a las cargas mayoradas y determinadas mediante análisis. Se debería considerar el máximo momento calculado en el elemento en cada dirección, incluyendo los efectos de segundo orden. Cuando los máximos ocurran en secciones transversales diferentes se deberían verificar todas ellas.

Para obtener mayor información sobre el cálculo de las resistencias a flexión mayoradas respecto de los ejes x e y, ver el Artículo C6.8.2.3.

6.9.3 Relación de esbeltez límite

Los elementos solicitados a compresión deberán satisfacer los requisitos de esbeltez especificados a

continuación:

- Para elementos principales $\frac{K\ell}{r} \leq 120$
- Para elementos de arriostramiento $\frac{K\ell}{r} \leq 140$

donde:

K = factor de longitud efectiva especificado en el Artículo 4.6.2.5

ℓ = longitud no arriostrada (mm)

r = mínimo radio de giro (mm)

Exclusivamente para los propósitos del presente artículo, el radio de giro se podrá calcular sobre una sección ideal que desprece parte del área de un componente, siempre que:

- La capacidad del componente en base al área y radio de giro reales sea mayor que las cargas mayoradas, y
- La capacidad del componente ideal en base a un área reducida y al correspondiente radio de giro también sea mayor que las cargas mayoradas.

6.9.4 Elementos no compuestos

6.9.4.1 Resistencia nominal a la compresión

Para los elementos que satisfacen los requisitos de ancho/espesor especificados en el Artículo 6.9.4.2, la resistencia nominal a la compresión, P_n , se deberá tomar como:

- Si $\lambda \leq 2.25$, entonces:

$$P_n = 0.66^{\lambda} F_y A_g \quad (6.9.4.1-1)$$

- Si $\lambda > 2.25$, entonces:

$$P_n = \frac{0.88 F_y A_g}{\lambda} \quad (6.9.4.1-2)$$

donde:

$$\lambda = \left(\frac{K\ell}{r_s \pi} \right)^2 \frac{F_y}{E} \quad (6.9.4.1-3)$$

y donde:

A_g = área bruta de la sección transversal (mm²)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada (MPa)

C6.9.4.1

Estas ecuaciones son idénticas a las ecuaciones para diseño de columnas de AISC (1999). En esencia, ambas son iguales a la curva $2P$ para determinar la resistencia de columnas desarrollada por Galambos (1998). Incorporan un criterio de falta de linealidad de $L/1500$. El desarrollo de la formulación matemática de estas ecuaciones se puede consultar en el trabajo de Tide (1985), mientras que la confiabilidad que pretenden introducir se discute en el trabajo de Galambos (1998).

Los elementos comprimidos de simetría simple o no simétricos, tales como los perfiles simples o las secciones en forma de Te, y los elementos comprimidos de simetría doble, tales como los elementos en forma de cruz o los elementos armados de paredes de muy poco espesor, pueden ser gobernados por los modos de pandeo flexo-torsional o torsional, y no por el modo de pandeo axial convencional reflejado en las Ecuaciones 1 y 2. AISC (1999) trata el diseño de estos elementos para estos modos de pandeo menos convencionales.

Las partes que no satisfacen los requisitos de ancho/esbeltez del Artículo 6.9.4.2 deberían ser clasificados como elementos esbeltos. AISC (1999) trata el diseño de elementos que incluyen este tipo de componentes.

E = módulo de elasticidad (MPa)

K = factor de longitud efectiva especificado en el Artículo 4.6.2.5

ℓ = longitud no arriostrada (mm)

r_s = radio de giro respecto del plano de pandeo (mm)

6.9.4.2 Coeficientes de pandeo de placas y ancho de placas para compresión axial

A menos que aquí se especifique lo contrario, la esbeltez de las placas deberá satisfacer:

$$\frac{b}{t} \leq k \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (6.9.4.2-1)$$

donde:

k = coeficiente de pandeo de placas como se especifica en la Tabla 1

b = ancho de la placa como se especifica en la Tabla 1 (mm)

t = espesor de la placa (mm)

El semiancho de las alas de las secciones doble Te armadas deberá satisfacer:

$$\frac{b}{t} \leq 0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}} \quad (6.9.4.2-2)$$

y

$$0.35 \leq k_c \leq 0.76 \quad (6.9.4.2-3)$$

donde:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{D/t_w}} \quad (6.9.4.2-4)$$

y donde:

b = semiancho del ala (mm)

D = profundidad del alma (mm)

C6.9.4.2

El propósito de este artículo es asegurar que los elementos uniformemente comprimidos puedan desarrollar la resistencia a la fluencia en compresión antes que aparezca pandeo local. Esto no garantiza que la capacidad de deformación inelástica del elemento bajo tensión constante sea suficiente para permitir la plastificación total de la sección transversal, para lo cual se aplican los requisitos de ancho/espesor más restrictivos indicados en la parte aplicable del Artículo 6.10.

La forma de las ecuaciones ancho/espesor se deriva de la fórmula clásica para determinar la tensión elástica crítica para placas: $F_{cr} = [\pi^2 k E] / [12(1-\mu^2)(b/t)^2]$, en la cual el coeficiente de pandeo, k , es función de las condiciones de carga y de apoyo. Para una placa larga uniformemente comprimida con un borde longitudinal simplemente apoyado contra la rotación y el otro libre, $k = 0.425$, y para el caso de ambos bordes simplemente apoyados $k = 4.00$ (Timoshenko y Gere 1961). Para estas condiciones los coeficientes de la ecuación de b/t se convierten en 0.620 y 1.901, respectivamente. Los coeficientes aquí especificados son el resultado de análisis adicionales y numerosos ensayos y reflejan el efecto de las tensiones residuales, las imperfecciones iniciales y las condiciones de apoyo reales (diferentes de las ideales).

En el caso de las alas salientes de las secciones doble Te armadas solicitadas a compresión axial se considera la interacción alma-ala. La teoría indica que en las secciones doble Te armadas solicitadas a compresión axial la interacción alma-ala es como mínimo tan severa como para la flexión. El factor k_c toma en cuenta la interacción del pandeo local del ala y el alma comprobada mediante los experimentos realizados por Johnson (1985). Para las secciones armadas en las cuales $D/t_w \geq 130.6$, k_c se puede tomar igual a 0.35. Para valores de D/t_w más pequeños, k_c aumenta de 0.35 hasta un valor máximo de 0.76 en función de la esbeltez del alma D/t_w . Con un valor de k_c igual a 0.76 se obtiene un valor de k igual a 0.56. Las secciones doble Te laminadas se excluyen de este criterio debido a que para estas secciones los efectos de la interacción alma-ala se

El espesor de pared de los tubos deberá satisfacer:

consideran despreciables.

• Para tubos circulares: $\frac{D}{t} \leq 2.8 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (6.9.4.2-5)

• Para tubos rectangulares: $\frac{b}{t} \leq 1.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ (6.9.4.2-6)

donde:

D = diámetro del tubo (mm)

B = ancho de la cara (mm)

t = espesor del tubo (mm)

Para los elementos diseñados utilizando las ecuaciones del Artículo 6.9.2.2, F_y , de acuerdo con el uso que aquí se le da, se puede reemplazar por la máxima tensión de compresión calculada debida a la carga axial mayorada y el momento flector concurrente.

Tabla 6.9.4.2-1 Coeficientes de pandeo de placas y ancho de placas para compresión axial

| Placas apoyadas a lo largo de un borde | k | b |
|--|------|--|
| Alas y ramas salientes o placas | 0.56 | • En las secciones doble Te laminadas, semiancho de ala |
| | | • En las secciones tipo canal, ancho de ala total |
| | | • En las placas, distancia entre el borde libre y la primera línea de bulones o soldaduras |
| | | • Para los pares de perfiles tipo ángulo simple en contacto continuo, ancho total de una rama saliente |
| Almas de las secciones Te laminadas | 0.75 | • Profundidad total de la Te |
| Otros elementos salientes | 0.45 | • En los puntales compuestos por un único perfil tipo ángulo simple o por dos perfiles tipo ángulo simple con separador, ancho total de la rama saliente |
| | | • Para otros elementos, totalidad del ancho saliente |
| Placas apoyadas a lo largo de dos bordes | k | b |
| Alas de secciones tipo cajón y cubrejuntas | 1.40 | • Para las alas de secciones tipo cajón, distancia libre entre almas menos el radio de la esquina interna a cada lado |
| | | • Para los cubrejuntas en alas, distancia entre líneas de soldaduras o bulones |
| Almas y otros elementos tipo placa | 1.49 | • Para las almas de las vigas laminadas, distancia libre entre almas menos los radios de los chaflanes |
| | | • Para todos los demás elementos, distancia libre entre apoyos de borde |
| Cubrejuntas perforados | 1.86 | • Distancia libre entre apoyos de borde |

6.9.4.3 Elementos armados

6.9.4.3.1 Disposiciones generales

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.9.4.2. La relación de esbeltez de los elementos entre bulones de conexión no deberá ser mayor que 75 por ciento de la relación de esbeltez limitante del elemento.

6.9.4.3.2 Placas perforadas

Las placas perforadas deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.9.4.2 y 6.8.5.2, y se deberán diseñar para la sumatoria del esfuerzo de corte debido a las cargas mayores más un esfuerzo de corte adicional igual a:

$$V = \frac{P_r}{100} \left(\frac{100}{(\ell/r) + 10} + \frac{8.8(\ell/r)F_y}{E} \right) \quad (6.9.4.3.2-1)$$

donde:

V = esfuerzo de corte adicional (N)

P_r = resistencia a la compresión mayorada especificada en los Artículos 6.9.2.1 o 6.9.2.2 (N)

ℓ = longitud del elemento (mm)

r = radio de giro respecto de un eje perpendicular a la placa perforada (mm)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada (MPa)

6.9.5 Elementos compuestos

6.9.5.1 Resistencia nominal a la compresión

Los requisitos de este artículo se deberán aplicar a las columnas compuestas no solicitadas a flexión. Para las columnas compuestas solicitadas a flexión se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.12.2.3.

La resistencia nominal a la compresión de una columna compuesta que satisfaga los requisitos del Artículo 6.9.5.2 se deberá tomar como:

- Si $\lambda \leq 2.25$, entonces:

$$P_n = 0.66^{\lambda} F_e A_s \quad (6.9.5.1-1)$$

- Si $\lambda > 2.25$, entonces:

C6.9.5.1

El procedimiento para diseñar columnas compuestas es el mismo que se utiliza para diseñar columnas de acero, excepto que se modifican la resistencia a la fluencia mínima especificada del acero estructural, el módulo de elasticidad del acero y el radio de giro de la sección de acero para tomar en cuenta el efecto del hormigón y de las barras de armadura longitudinal. En los trabajos del SSRC Task Group 20 (1979) y Galambos y Chapuis (1980) el lector encontrará una explicación de estas modificaciones y una comparación del procedimiento de diseño contra los resultados de numerosos ensayos.

$$P_n = \frac{0.88 F_e A_s}{\lambda} \quad (6.9.5.1-2)$$

donde:

$$\lambda = \left(\frac{K \ell}{r_s \pi} \right)^2 \frac{F_e}{E_e} \quad (6.9.5.1-3)$$

$$F_e = F_y + C_1 F_{yr} \left(\frac{A_r}{A_s} \right) + C_2 f'_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) \quad (6.9.5.1-4)$$

$$E_e = E \left[1 + \left(\frac{C_3}{n} \right) \left(\frac{A_c}{A_s} \right) \right] \quad (6.9.5.1-5)$$

donde:

A_s = área de la sección transversal de la sección de acero (mm^2)

A_c = área de la sección transversal de la sección de hormigón (mm^2)

A_r = área total de la armadura longitudinal (mm^2)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del acero (MPa)

F_{yr} = mínima resistencia a la fluencia especificada de la armadura longitudinal (MPa)

f'_c = mínima resistencia a la compresión especificada del hormigón a 28 días (MPa)

E = módulo de elasticidad del acero (MPa)

ℓ = longitud no arriostrada de la columna (mm)

K = factor de longitud efectiva como se especifica en el Artículo 4.6.2.5

n = relación de módulos del hormigón como se especifica en el Artículo 6.10.1.1.1b

r_s = radio de giro de la sección de acero en el plano de flexión, pero nunca menor que 0.3 veces el ancho del elemento compuesto en el plano de flexión en el caso de los perfiles compuestos con revestimiento de hormigón (mm)

$C_1, C_2,$

C_3 = constantes para columnas compuestas especificadas

en la Tabla 6.9.5.1-1

Tabla 6.9.5.1-1 Constantes para columnas compuestas

| | TUBOS RELLENOS | PERFILES REVESTIDOS |
|-------|----------------|---------------------|
| C_1 | 1.00 | 0.70 |
| C_2 | 0.85 | 0.60 |
| C_3 | 0.40 | 0.20 |

Al determinar la amplificación de momentos para los elementos compuestos solicitados por una combinación de compresión axial y flexión de acuerdo con el método aproximado especificado en el Artículo 4.5.3.2.2b se deberá aplicar lo siguiente:

$$P_e = \frac{A_s F_e}{\lambda}$$

(6.9.5.1-6)

6.9.5.2 Limitaciones

6.9.5.2.1 Disposiciones generales

Si el área de la sección transversal de acero representa al menos 4 por ciento del área total de la sección transversal, la resistencia a la compresión se deberá calcular de acuerdo con el Artículo 6.9.5.1.

Si el área de la sección transversal de acero representa menos de 4 por ciento del área total de la sección transversal, la resistencia a la compresión se deberá calcular como para una columna de hormigón armado de acuerdo con la Sección 5.

La resistencia a la compresión del hormigón deberá estar comprendida entre 20 MPa y 55 MPa.

La resistencia a la fluencia mínima especificada de la sección de acero y la armadura longitudinal utilizada para calcular la resistencia nominal a la compresión no deberá ser mayor que 420 MPa.

Al diseñar los componentes de apoyo se deberá considerar la transferencia de la totalidad de la carga en la columna compuesta.

La sección transversal deberá tener como mínimo un eje de simetría.

6.9.5.2.2 Tubos rellenos de hormigón

Los requisitos sobre espesor de pared para tubos sin relleno especificados en el Artículo 6.9.4.2 también se aplicarán a los tubos rellenos de hormigón.

6.9.5.2.3 Perfiles revestidos de hormigón

Los perfiles de acero revestidos de hormigón se deberán

C6.9.5.2.1

Muy pocos de los datos de ensayo en los cuales se basa el desarrollo de este requisito para el diseño de columnas compuestas se realizaron con hormigones de resistencia mayor que 40 MPa. Se cree que en todos los ensayos se utilizó hormigón de peso normal. Se especifica un límite inferior de 20 MPa para alentar el uso de hormigones de buena calidad.

C6.9.5.2.3

Las limitaciones referentes al ancho/espesor

reforzar con armadura longitudinal y lateral. La armadura deberá satisfacer los requisitos del Artículo 5.7.4.6, excepto que la separación vertical de los estribos laterales no deberá ser mayor que el menor valor entre:

- 16 diámetros de las barras longitudinales,
- 48 diámetros de las barras de los estribos, o
- 0.5 de la menor dimensión lateral del elemento compuesto.

Si hay múltiples perfiles de acero en una misma sección transversal de una columna compuesta, éstos deberán estar conectados entre sí mediante enlazado y placas de unión para evitar el pandeo de los perfiles individuales antes que el hormigón endurezca.

6.10 ELEMENTOS DE SECCIÓN DOBLE TE SOLICITADOS A FLEXIÓN

6.10.1 Disposiciones generales

Los requisitos de este artículo se aplican a la flexión de los elementos rectos de acero de sección doble Te laminados o fabricados simétricos respecto del eje vertical en el plano del alma. Estos requisitos abarcan el diseño de elementos compuestos y no compuestos, híbridos y no híbridos, de profundidad de alma constante y variable tal como se define en los Artículos 6.10.1.1 a 6.10.1.8 y con sujeción a los requisitos de dichos artículos. Estos requisitos también abarcan los efectos combinados de la flexión respecto del eje mayor y la flexión lateral de las alas, cualquiera sea su origen.

Todos los tipos de elementos de sección doble Te solicitados a flexión se deberán diseñar de manera que satisfagan, como mínimo:

- Los límites aplicables a las dimensiones de la sección transversal especificadas en el Artículo 6.10.2;
- Los requisitos sobre construibilidad especificados en el Artículo 6.10.3;
- Los requisitos sobre Estado Límite de Servicio especificados en el Artículo 6.10.4;
- Los requisitos sobre Estado Límite de Fatiga y Fractura especificados en el Artículo 6.10.5;
- Los requisitos sobre Estado Límite de Resistencia especificados en el Artículo 6.10.6.

En los elementos de alma esbelta, la resistencia al pandeo flexional del alma se deberá determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.9. Los factores de reducción de la resistencia para las alas de los elementos de alma

especificadas en el Artículo 6.9.4.2 no se aplican a los perfiles revestidos de hormigón debido a que se ha comprobado que el hormigón proporciona un apoyo adecuado contra el pandeo local.

C6.10.1

El Artículo 6.10.1 se ocupa de temas generales que se aplican a todos los tipos de secciones doble Te de acero. Los cinco puntos listados en las viñetas de este artículo indican la forma de organización dominante que se les ha dado a los requisitos para el diseño a flexión de los elementos rectos de sección doble Te. Cada uno de los artículos de la sección 6.10 ha sido escrito de modo que sean en gran medida independientes entre sí, minimizando así la necesidad de hacer referencia a múltiples artículos para tratar cualquiera de las consideraciones fundamentales del diseño. Para el Estado Límite de Resistencia, el Artículo 6.10.6 dirige la atención del Ingeniero a los Artículos 6.10.7 a 6.10.12 siguientes, y opcionalmente a los Apéndices A y B, para hallar los requisitos de diseño apropiados en base al tipo de sección doble Te de que se trate. Los requisitos específicos de estos Artículos y Apéndices se discuten en los correspondientes Artículos del Comentario.

Los requisitos del Artículo 6.10 y de los Apéndices A y B opcionales proveen un enfoque unificado para considerar la combinación de flexión respecto del eje mayor y la flexión lateral de las alas cualquiera sea su origen. Para la mayoría de los puentes rectos no oblicuos, los efectos de la flexión lateral de las alas tienden a ser más significativos en la condición final, una vez terminada la construcción. El viento, la torsión que provocan las cargas excéntricas del vuelo del tablero de hormigón que actúan sobre ménsulas en voladizo dispuestas a lo largo de las vigas exteriores, y el uso de marcos transversales alternados en combinación con ángulos de oblicuidad superiores a 20° pueden provocar una flexión lateral significativa en las alas. En estos casos considerar o no la flexión lateral de las alas quedará a criterio del Ingeniero. A pesar de que para satisfacer estos

esbelta y/o de los elementos híbridos se deberá determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.

Los marcos transversales y diafragmas para secciones doble Te deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.7.4. Cuando sea requerido, el arriostramiento lateral para las secciones doble Te deberá satisfacer los requisitos del Artículo 6.7.5.

requisitos no se exige el uso de métodos de análisis refinados, estos métodos, cuando se los utiliza, sí permiten considerar estos efectos. Algunos de estos efectos no eran tratados explícitamente en las Especificaciones anteriores. La intención de los requisitos del Artículo 6.10 es permitirle al Ingeniero considerar los efectos de la flexión lateral de las alas en el diseño de manera directa y racional, si es que entiende que este efecto puede ser significativo. Una estimación razonable sugerida para f_t debida a los efectos de la oblicuidad es 69 MPa. Si se considera que los efectos antes mencionados son despreciables o incidentales, el término correspondiente a la flexión lateral de las alas, f_t , simplemente se toma igual a cero en las ecuaciones. En este caso el formato de las ecuaciones se reduce simplemente al formato más convencional y familiar utilizado para verificar la resistencia nominal a la flexión de las secciones doble Te en ausencia de flexión lateral de las alas.

El hecho de que aquí se presenten nuevas ecuaciones y requisitos de diseño no implica que los puentes existentes sean inseguros o estructuralmente deficientes. Tampoco impone la necesidad de rehabilitar o reevaluar la capacidad de carga de las estructuras existentes para satisfacer estos requisitos.

En el Apéndice C se presentan diagramas de flujo para el diseño de elementos de sección doble Te. Los cálculos fundamentales para los elementos solicitados a flexión que anteriormente se encontraban en el Artículo 6.10.3 de AASHTO (1998) se han movido al Apéndice D.

6.10.1.1 Secciones compuestas

Las secciones que consisten en un tablero de hormigón que provee acción compuesta comprobada y apoyo lateral conectado a una sección de acero mediante conectores de corte diseñados de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.10 se deberán considerar secciones compuestas.

6.10.1.1.1 Tensiones

6.10.1.1.1a Secuencia de carga

En cualquier ubicación de la sección compuesta la tensión elástica debida a las cargas aplicadas deberá ser igual a la sumatoria de las tensiones provocadas por las cargas aplicadas separadamente a:

- La sección de acero,
- La sección compuesta a corto plazo, y
- La sección compuesta a largo plazo.

En el caso de las construcciones no apuntaladas, se deberá asumir que la carga permanente aplicada antes que el tablero de hormigón se haya endurecido o se haya vuelto

C6.10.1.1.1a

Las Especificaciones anteriores indicaban que las losas de hormigón se pueden considerar lo suficientemente endurecidas una vez que el hormigón alcanza el 75 por ciento de su resistencia a la compresión especificada a 28 días, f'_c . A criterio del Ingeniero se podrán utilizar otros indicadores.

Aunque estos requisitos permiten utilizar construcciones apuntaladas, no se recomienda su uso. En general las construcciones no apuntaladas resultan más económicas. Además, estos requisitos pueden no ser suficientes para las construcciones apuntaladas en las cuales sea importante respetar pequeñas tolerancias en las contraflechas de las

compuesto es soportada exclusivamente por la sección de acero; también se deberá asumir que la carga permanente y sobrecarga aplicadas luego de esta etapa serán soportadas por la sección compuesta. En el caso de las construcciones apuntaladas, se deberá asumir que toda la carga permanente se aplica después que el tablero de hormigón se ha endurecido o se ha vuelto compuesto y la documentación técnica así lo deberá especificar.

6.10.1.1.1b Tensiones para secciones en flexión positiva

Para calcular las tensiones de flexión en las secciones sujetas a flexión positiva, la sección compuesta deberá consistir en la sección de acero y el área transformada del ancho efectivo del tablero de hormigón.

Para las cargas temporarias que se suponen aplicadas a la sección compuesta a corto plazo, el área del tablero de hormigón se deberá transformar utilizando la relación de módulos a corto plazo, n . Para las cargas permanentes que se suponen aplicadas a la sección compuesta a largo plazo, el área del tablero de hormigón se deberá transformar usando la relación de módulos a largo plazo, $3n$. Cuando en el Estado Límite de Resistencia los momentos debidos a las cargas temporarias y permanentes sean de signo opuesto, la sección compuesta asociada se podrá utilizar con cada uno de estos momentos si la tensión neta resultante en el tablero de hormigón debido a la sumatoria de los momentos mayorados es de compresión. Caso contrario, para determinar las tensiones en la sección de acero se deberán utilizar los requisitos del Artículo 6.10.1.1.1c. Las tensiones en el tablero de hormigón se deberán determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.1.1d

La relación de módulos se debería tomar como:

$$n = \frac{E}{E_c} \quad (6.10.1.1.1b-1)$$

donde:

E_c = módulo de elasticidad del hormigón determinado como se especifica en el Artículo 5.4.2.4 (MPa)

6.10.1.1.1c Tensiones para secciones en flexión negativa

Para calcular las tensiones de flexión en las secciones sujetas a flexión negativa, la sección compuesta tanto para los momentos a corto plazo como para los momentos a largo plazo deberá consistir en la sección de acero más la armadura longitudinal que se encuentra dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón, a menos que en los

vigas. Las investigaciones realizadas para determinar los efectos de la fluencia lenta del hormigón sobre las vigas de acero compuestas bajo grandes cargas permanentes son limitadas. No se conocen ejemplos de puentes importantes de construcción apuntalada en Estados Unidos. Se sabe que en Alemania se construyeron puentes compuestos apuntalados que no mantuvieron su acción compuesta. Además, la probabilidad de que ocurran tensiones de tracción significativas en el tablero de hormigón en los puntos de apoyo permanente es mayor cuando se utiliza construcción apuntalada.

C6.10.1.1.1b

Para el hormigón de peso normal, la relación de módulos se puede tomar como:

| | |
|---------------------|----------|
| $16 \leq f'_c < 20$ | $n = 10$ |
| $20 \leq f'_c < 25$ | $n = 9$ |
| $25 \leq f'_c < 32$ | $n = 8$ |
| $32 \leq f'_c < 41$ | $n = 7$ |
| $41 \leq f'_c$ | $n = 6$ |

Artículos 6.6.1.2.1, 6.10.1.1.1d o 6.10.4.2.1 se especifique lo contrario.

6.10.1.1.1d Tensiones en el tablero de hormigón

Para calcular las tensiones de flexión longitudinales en el tablero debidas a todas las cargas permanentes y transitorias se deberá utilizar la relación de módulos a corto plazo, n .

C6.10.1.1.1d

Las Especificaciones anteriores exigían calcular las tensiones de flexión longitudinales en el tablero debidas a la carga permanente usando la sección correspondiente a n o $3n$, cualquiera fuera la que produjera la tensión más crítica en el tablero. Cuando las tensiones en el tablero debidas a las cargas a corto plazo y permanentes tienen el mismo signo, típicamente el cálculo de las tensiones del tablero es determinado por la sección correspondiente a n . Además, la máxima compresión combinada en el tablero generalmente ocurre en una sección en la cual las tensiones permanentes y a corto plazo son aditivas. Sin embargo, al considerar la longitud de tablero sobre la cual se han de aplicar los requisitos del Artículo 6.10.1.7, es posible que, al ser menores las tensiones de compresión debidas a las cargas permanentes, las tensiones netas de tracción cerca de los puntos de inflexión sean mayores. En estos casos, la tensión de tracción más crítica en el tablero se obtiene cuando para calcular las tensiones debidas a las cargas permanentes se utiliza la sección correspondiente a $3n$. Este nivel de refinamiento en el cálculo de las tensiones longitudinales del tablero se considera innecesario.

6.10.1.1.1e Ancho efectivo del tablero de hormigón

El ancho efectivo del tablero de hormigón se deberá determinar como se especifica en el Artículo 4.6.2.6.

6.10.1.2 Secciones no compuestas

Las secciones en las cuales el tablero de hormigón no esté conectado a la sección de acero mediante conectores de corte diseñados de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.10 se deberán considerar secciones no compuestas.

C6.10.1.2

Aunque tampoco se prohíbe, no se recomienda el uso de secciones no compuestas.

6.10.1.3 Secciones híbridas

La mínima resistencia a la fluencia especificada del alma no debería ser menor que el mayor valor entre el 70 por ciento de la mínima resistencia a la fluencia especificada del ala de mayor resistencia y 250 MPa.

Para los elementos en los cuales el acero del alma es de mayor resistencia que el acero de una o ambas alas, la resistencia a la fluencia del alma utilizada para determinar la resistencia a la flexión y al corte no se deberá tomar mayor que 120 por ciento de la mínima resistencia a la fluencia especificada del ala de menor resistencia.

C6.10.1.3

Las secciones híbridas – las cuales consisten en un alma cuya resistencia a la fluencia mínima especificada es menor que la de una o ambas alas – se pueden diseñar usando estas Especificaciones. Aunque estos requisitos se pueden aplicar de manera segura a todos los tipos de secciones híbridas (*ASCE 1968*), se recomienda que preferentemente la diferencia entre la resistencia a la fluencia mínima especificada del alma y la del ala de mayor resistencia se limite a un grado de acero. Se cree que este tipo de secciones son más eficientes desde el punto de vista del diseño. Para este tipo de secciones el límite superior de F_{yw} sobre el valor de F_{yr} , determinado en los Artículos

6.10.8.2.2, 6.10.8.2.3, A6.3.2 o A6.3.3 según corresponda, no es determinante. Además, tal como se discute en el Artículo C10.1.9.1, este límite mínimo establecido para la resistencia a la fluencia del alma protege a las almas de las vigas híbridas esbeltas contra el pandeo flexional inelástico.

Los datos de ensayo disponibles referentes a secciones con resistencias a la fluencia en el alma nominalmente mayores que en una o ambas alas son limitados. No obstante, en muchos ensayos experimentales la resistencia a la fluencia real del alma de menor espesor es mayor que la de las alas. Estas Especificaciones limitan la resistencia nominal a la fluencia del alma que se utiliza para determinar la resistencia a la flexión y al corte a un rango de valores que se apoya en los datos de ensayos disponibles.

6.10.1.4 Secciones de profundidad de alma variable

Al determinar la tensión en el ala inferior provocada por la flexión respecto del eje mayor de la sección transversal se deberá considerar el efecto de la inclinación del ala inferior. Cuando las condiciones de equilibrio estático así lo permitan, el corte en el alma debido a las cargas permanentes se puede reducir en un valor igual a la componente vertical de la fuerza en el ala inferior.

En los puntos en los cuales el ala inferior se vuelve horizontal se deberá considerar la transferencia de la componente vertical de la fuerza en el ala nuevamente al alma.

C6.10.1.4

Si la tensión normal en un ala inferior inclinada, calculada sin considerar la flexión lateral del ala, se determina simplemente dividiendo el momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal por el módulo resistente elástico de la sección, por lo general esta tensión es subestimada. La tensión normal dentro de un ala inferior inclinada se puede determinar en primer lugar calculando la componente horizontal de la fuerza en el ala requerida para desarrollar este momento flector como:

$$P_h = MA_f / S_x \quad (\text{C6.10.1.4-1})$$

donde:

A_f = área del ala inferior inclinada (mm^2)

M = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal en la sección considerada (N-mm)

S_x = módulo resistente elástico de la sección hasta el ala inferior inclinada (mm^3)

En el caso de las secciones compuestas, para calcular P_h se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.1.1.1a. Luego la tensión normal en el ala inclinada, f_n , se puede determinar como (*Blodgett 1982*):

$$f_n = P_h / A_f \cos \theta \quad (\text{C6.10.1.4-2})$$

donde:

θ = ángulo de inclinación del ala inferior ($^\circ$)

La correspondiente componente vertical de la fuerza en

el ala, P_v , se puede determinar como:

$$P_v = P_h \tan \theta \quad (\text{C6.10.1.4-3})$$

Esta componente de la fuerza en el ala afecta el corte vertical en el alma. En las regiones de flexión positiva con enriñonados de sección uniformemente variable o parabólicos con pendiente hacia los apoyos, el corte en el alma vertical es incrementado por P_v . Para los enriñonados tipo “fish belly,” $P_v = 0$ cerca de los apoyos. Para todos los demás casos, el corte vertical en el alma es reducido por P_v . En estos casos las Especificaciones permiten que el Ingeniero reduzca el corte por carga permanente en el alma de manera acorde. Calcular este corte reducido debido a la sobrecarga es complicado, ya que es necesario evaluar numerosos conjuntos de momentos y cortes concurrentes a fin de determinar la reducción de corte menor o crítica, y por lo tanto probablemente no valga el esfuerzo. Además, la mayoría de las almas de profundidad variable se utilizan en vigas de tramo largo en las cuales la carga permanente es más predominante.

En los enriñonados parabólicos, en los cuales la pendiente descendiente del ala inferior es mayor en posiciones más próximas al apoyo interior, el cambio de la inclinación del ala inferior en combinación con la tensión de compresión en el ala inferior induce una fuerza transversal de compresión distribuida sobre el alma (*Blodgett 1982*). En este tipo de enriñonados, si el alma de la viga no está rigidizada o si está rigidizada transversalmente pero la separación entre rigidizadores, d_o , es mayor que aproximadamente $1.5D$, el Ingeniero debería verificar la estabilidad del alma bajo esta fuerza.

En los puntos en los cuales un ala inclinada se vuelve horizontal, la componente vertical de la fuerza en el ala inclinada se transfiere nuevamente hacia el alma en forma de una carga concentrada. Esta carga concentrada provoca tensión adicional en el alma y en las soldaduras entre el alma y el ala inferior, y con frecuencia requiere de rigidización adicional. En estas ubicaciones, el alma es suficiente y no requiere rigidización adicional si se satisface el requisito del Artículo D6.5.2 usando una longitud de apoyo N igual a cero. En las ubicaciones donde la carga concentrada es de compresión y N es igual a cero, los requisitos del Artículo D6.5.2 generalmente prevalecen sobre aquellos del Artículo D6.5.3; por lo tanto, satisfacer los requisitos del Artículo D6.5.2 usando una longitud de apoyo N igual a cero asegura que el alma sea adecuada sin rigidización adicional en ubicaciones sometidas a cargas transversales concentradas de compresión o tracción.

6.10.1.5 Rigidez

Para el análisis de los elementos flexionales se deberán

C6.10.1.5

De acuerdo con la práctica habitual, se especifica que

utilizar las siguientes propiedades de rigidez:

- Para cargas aplicadas a secciones no compuestas: propiedades de rigidez de la sección de acero solamente.
- Para cargas permanentes aplicadas en secciones compuestas: propiedades de rigidez de la sección compuesta a largo plazo, suponiendo que el tablero de hormigón es efectivo sobre la totalidad de la longitud del tramo.
- Para cargas transitorias aplicadas a secciones compuestas: propiedades de rigidez de la sección compuesta a corto plazo, suponiendo que el tablero de hormigón es efectivo sobre la totalidad de la longitud del tramo.

6.10.1.6 Tensiones en las alas y momentos flectores en los elementos

Para las verificaciones de diseño en que la resistencia a la flexión se basa en el pandeo lateral torsional:

- La tensión f_{bu} se deberá determinar como el mayor valor de la tensión de compresión en el ala considerada en la totalidad de la longitud no arriostrada, calculada sin considerar el pandeo lateral de las alas.
- El momento M_u se deberá determinar como el mayor valor del momento flector respecto del eje mayor en la totalidad de la longitud no arriostrada que provoca compresión en el ala considerada.
- La tensión f_ℓ se deberá determinar como el mayor valor de la tensión debida a flexión lateral en la totalidad de la longitud no arriostrada en el ala considerada.

Para las verificaciones de diseño en que la resistencia a la flexión se basa en la fluencia, el pandeo local de las alas o el pandeo flexional del alma, f_{bu} , M_u y f_ℓ se podrán determinar como los correspondientes valores en la sección considerada.

Los valores de f_{bu} , M_u y f_ℓ se deberán determinar en base a las cargas mayoradas y se deberán tomar con signo positivo en todas las ecuaciones de resistencia.

Las tensiones de flexión lateral en las alas con apoyo lateral continuo se deberán tomar igual a cero. Las tensiones de flexión lateral en las alas con arriostramiento discreto se deberá determinar mediante un análisis estructural. Todas las alas con arriostramiento discreto deberán satisfacer:

$$f_f < 0.6F_{yf} \quad (6.10.1.6-1)$$

para las secciones no compuestas se debe utilizar la rigidez de la sección de acero solamente, a pesar de que numerosos ensayos in situ han demostrado que en este tipo de secciones hay un nivel considerable de acción compuesta no intencional.

Ensayos realizados in situ sobre puentes compuestos continuos han demostrado que en las regiones de flexión negativa hay una acción compuesta considerable (*Baldwin et al. 1978; Roeder y Eltvik 1985; Yen et al. 1995*). Por lo tanto, al analizar elementos flexionales compuestos se deberá utilizar la rigidez de la totalidad de la sección compuesta para la totalidad de la longitud del puente.

C6.10.1.6

Para verificar la resistencia al pandeo lateral torsional, generalmente el valor apropiado de la tensión f_{bu} o del momento M_u es el mayor valor que provoca compresión en el ala considerada en la totalidad de la longitud no arriostrada.

En el caso de un ala de compresión con arriostramiento discreto también sujeta a flexión lateral, cuando la resistencia se base en el pandeo lateral torsional se deberá usar la mayor tensión lateral en la totalidad de la longitud no arriostrada del ala considerada en combinación con f_{bu} o M_u . Estas Especificaciones consideran la combinación de flexión vertical y flexión lateral de las alas tratando a las alas como vigas-columnas equivalentes. Cuando la resistencia es determinada por la estabilidad del elemento (es decir por el pandeo lateral torsional), el uso de los valores máximos de f_ℓ y f_{bu} o M_u en la totalidad de la longitud no arriostrada es consistente con las prácticas habituales en la correcta aplicación de las ecuaciones de interacción para vigas-columnas.

Los estados límites considerados son la fluencia, el pandeo local de las alas y el pandeo flexional del alma. Por lo tanto, se permite que para verificar estos estados límites el Ingeniero utilice valores de f_ℓ y f_{bu} o M_u de secciones transversales coincidentes. En general, este enfoque requiere verificar los estados límites en diferentes secciones a lo largo de la longitud no arriostrada. Cuando los valores máximos de f_ℓ y f_{bu} o M_u ocurren en diferentes ubicaciones sobre la longitud no arriostrada, una práctica conservadora consiste en utilizar los valores máximos y aplicar una sola vez las ecuaciones de fluencia y pandeo local de las alas. La flexión lateral de las alas no participa en las ecuaciones de resistencia al pandeo flexional del alma.

En ausencia de un análisis más refinado, el Artículo C6.10.3.4 proporciona ecuaciones aproximadas para

En las alas de compresión con arriostramiento discreto la tensión de flexión lateral de las alas, f_ℓ , se puede determinar directamente a partir de un análisis elástico de primer orden para lo cual:

$$L_b \leq 1.2L_p \sqrt{\frac{C_b R_b}{f_{bm} / F_{yc}}} \quad (6.10.1.6-2)$$

o de forma equivalente:

$$L_b \leq 1.2L_p \sqrt{\frac{C_b R_b}{M_{bm} / M_{yc}}} \quad (6.10.1.6-3)$$

donde:

C_b = modificador del gradiente de momentos especificado en los Artículos 6.10.8.2.3 o A6.3.3, según corresponda.

f_{bm} = mayor valor de la tensión de compresión en el ala considerada en la totalidad de la longitud no arriostrada, calculada sin considerar la flexión lateral de las alas (MPa). f_{bm} se deberá determinar en base a las cargas mayoradas.

L_b = longitud no arriostrada (mm)

L_p = longitud no arriostrada límite especificada en el Artículo 6.10.8.2.3 (mm)

M_{bm} = mayor valor del momento flector respecto del eje mayor en la totalidad de la longitud no arriostrada que provoca compresión en el ala considerada (N-mm). M_{bm} se deberá determinar en base a las cargas mayoradas.

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2 (N-mm)

Si no se satisfacen las Ecuaciones 2 o 3, según corresponda, se deberán determinar las tensiones de flexión lateral elásticas de segundo orden en el ala de compresión.

Las tensiones de flexión lateral de segundo orden en el ala de compresión se pueden determinar amplificando los valores de primer orden de la siguiente manera:

calcular los máximos momentos de flexión lateral de las alas debidos a las cargas excéntricas del vuelo del tablero de hormigón actuando sobre las ménsulas en voladizo ubicadas a lo largo de los elementos exteriores. La determinación de los momentos en las alas debidos al viento se discute en el Artículo 4.6.2.7. La mejor manera de determinar los momentos de flexión lateral de las alas debidos al efecto de marcos transversales desfasados y/o la oblicuidad de los apoyos consiste en un análisis estructural directo de la superestructura del puente.

Se puede considerar que el ala superior tiene apoyo lateral continuo cuando tiene revestimiento de hormigón o está anclada al tablero mediante conectores de corte que satisfacen los requisitos del Artículo 6.10.10. No es necesario considerar los efectos de la flexión lateral del ala en el caso de las alas con apoyo lateral continuo traccionadas o comprimidas. Una vez que se coloca el tablero de hormigón las tensiones de flexión lateral adicionales son pequeñas. Una vez que se ha colocado el tablero no es necesario considerar las tensiones de flexión lateral inducidas en un ala con apoyo lateral continuo con anterioridad a esta etapa. La resistencia del tablero de hormigón compuesto generalmente es adecuada para compensar el hecho de despreciar estas tensiones de flexión lateral iniciales. Si el tablero no le provee apoyo lateral continuo al ala superior, el Ingeniero debería considerar las tensiones de flexión lateral no compuestas en dicha ala.

Los requisitos del Artículo 6.10 acerca de cómo tratar la combinación de flexión vertical y lateral de las alas se limitan a las secciones doble Te cargadas fundamentalmente en flexión respecto del eje mayor. Para los casos en los cuales la tensión de flexión lateral del ala calculada en forma elástica es mayor que aproximadamente $0.6F_{yf}$, la reducción de la resistencia a la flexión respecto del eje mayor debida a la flexión lateral de las alas tiende a ser mayor que la determinada en base a estos requisitos. Los requisitos establecidos en estas Especificaciones para los estados límites de servicio y resistencia son suficientes para asegurar el comportamiento aceptable de las vigas doble Te con valores de f_ℓ calculados elásticamente algo mayores que este límite.

Las Ecuaciones 2 o 3, según corresponda, simplemente proveen un valor máximo de L_b para el cual $f_\ell = f_{\ell 1}$ en las Ecuaciones 4 o 5. Las Ecuaciones 4 o 5, según corresponda, son fórmulas aproximadas que toman en cuenta la amplificación de las tensiones de flexión lateral de primer orden del ala comprimida debida a los efectos de segundo orden. Esta ecuación, que es una forma establecida para estimar los máximos momentos elásticos de segundo orden en elementos tipo viga-columna arriostrados cuyos extremos no están restringidos mediante otros marcos, tiende a ser significativamente conservadora en el caso de longitudes no arriostradas más largas que se asocian con

$$f_{\ell} = \left(\frac{0.85}{1 - \frac{f_{bm}}{F_{cr}}} \right) f_{\ell 1} \geq f_{\ell 1} \quad (6.10.1.6-4)$$

o de manera equivalente:

$$f_{\ell} = \left(\frac{0.85}{1 - \frac{M_{bm}}{F_{cr} S_{xc}}} \right) f_{\ell 1} \geq f_{\ell 1} \quad (6.10.1.6-5)$$

donde:

$F_{\ell 1}$ = tensión de flexión lateral de primer orden en el ala de compresión en la sección considerada, o máxima tensión de flexión lateral de primer orden en el ala de compresión considerada en la totalidad de la longitud no arriostrada, según corresponda (MPa)

F_{cr} = tensión de pandeo lateral torsional elástico para el ala considerada determinada a partir de las Ecuaciones 6.10.8.2.3-8 o A6.3.3-8. La Ecuación A6.3.3-8 sólo se puede aplicar para longitudes no arriostradas en las cuales el alma es compacta o no compacta

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de compresión, tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm³)

6.10.1.7 Mínima armadura para flexión negativa en el tablero de hormigón

Donde la tensión de tracción longitudinal en el tablero de hormigón debida ya sea a las cargas constructivas mayoradas o a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II de la Tabla 3.4.1-1 sea mayor que ϕf_r , la sección total de la armadura longitudinal no deberá ser menor que 1 por ciento del área total de la sección transversal del tablero de hormigón. f_r se deberá tomar como el módulo de rotura del hormigón, determinado como se especifica en el Artículo 5.4.2.6, y ϕ se deberá tomar como el factor de resistencia apropiado para hormigón traccionado especificado en el Artículo 5.5.4.2.1. Las tensiones longitudinales en el tablero de hormigón se deberán determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.1.d. La armadura utilizada para satisfacer este requisito deberá tener una mínima resistencia a la fluencia especificada mayor o igual que 400 MPa y su tamaño no

valores de f_{bm} próximos a F_{cr} (White et al. 2001). Este conservadurismo existe aun cuando para calcular F_{cr} se considere un factor de longitud efectiva para pandeo lateral torsional y/o un modificador del gradiente de momentos C_b , e incluso cuando uno de los extremos del segmento no arriostrado considerado no esté restringido por un segmento adyacente. Aunque las Ecuaciones 4 y 5 se utilizan para estimar la máxima tensión de flexión lateral de segundo orden dentro de la longitud no arriostrada, estas ecuaciones también se pueden utilizar para estimar las tensiones de flexión lateral de segundo orden en cualquier sección transversal dentro de la longitud no arriostrada considerada usando el valor de $f_{\ell 1}$ correspondiente a dicha ubicación.

El propósito de las Ecuaciones 4 y 5 es evitar de manera conservadores las grandes longitudes no arriostradas en las cuales los efectos de segundo orden de la flexión lateral de las alas son significativos. En situaciones constructivas para las cuales en estas ecuaciones la amplificación es importante, puede que el Ingeniero desee considerar un análisis no lineal geométrico directo de manera de determinar con mayor precisión los efectos de segundo orden dentro de la superestructura, o bien utilizar un valor menor del factor de longitud efectiva para pandeo lateral torsional de manera de aumentar F_{cr} apropiadamente de acuerdo con el procedimiento sugerido en el Artículo C6.10.8.2.3.

Observar que el valor de F_{cr} calculado para utilizar en la Ecuación 4 no se limita a $R_b R_h F_{yc}$ como se especifica en el Artículo 6.10.8.2.3, y que el valor de $F_{cr} S_{xc}$ calculado para utilizar en la Ecuación 5 no se limita a $R_{pc} M_{yc}$ como se especifica en el Artículo A6.3.3.

Las definiciones de alma compacta y alma no compacta se discuten en el Artículo C6.10.6.2.3.

C6.10.1.7

Especificando el uso de una cuantía del 1 por ciento con barras de tamaño no mayor que el de las barras No. 20, una resistencia a la fluencia mayor o igual que 400 MPa, y una separación no mayor que 300 mm se pretende controlar la fisuración del tablero de hormigón. Los criterios a considerar para controlar la fisuración del hormigón se discuten más detalladamente en AASHTO (1991) y en Haaijer et al. (1987).

Anteriormente, el requisito de la cuantía del 1 por ciento se limitaba a las regiones de flexión negativa de tramos continuos, que con frecuencia implícitamente se tomaban como las regiones entre puntos de contraflexión bajo carga permanente. Bajo la acción de sobrecargas móviles el tablero puede experimentar tensiones de tracción significativas fuera de dichos puntos de contraflexión. La colocación del tablero en etapas también produce flexión

debe ser mayor que el de las barras No. 20.

La armadura requerida se debería colocar en dos capas uniformemente distribuidas en el ancho del tablero, colocando dos tercios de la armadura en la capa superior. La separación entre barras individuales no deberá ser mayor que 300 mm.

Si en la región de momento negativo no se utilizan conectores de corte, toda la armadura longitudinal se deberá prolongar hacia la región de momento positivo, más allá de los conectores de corte adicionales especificados en el Artículo 6.10.10.3, una distancia no menor que la longitud de anclaje especificada en la Sección 5.

negativa durante la etapa constructiva en las regiones en las cuales el tablero ya ha sido colocado, aunque bajo las condiciones finales estas regiones estén sujetas fundamentalmente a flexión positiva. Las deformaciones térmicas y por contracción también pueden provocar tensiones de tracción en regiones del tablero en las cuales normalmente no se anticiparían. Para tomar en cuenta todo esto se establece la colocación de una cuantía de armadura longitudinal del 1 por ciento donde la tensión de tracción en el tablero debida a las cargas constructivas mayoradas, incluyendo las cargas durante las diferentes fases de la secuencia de colocación del tablero, o debida a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II de la Tabla 3.4.1-1, sea mayor que ϕf . Si se satisfacen los requisitos de este artículo para controlar el tamaño de fisura en las regiones donde también se provee conexión de corte adecuada, se puede considerar que el tablero es efectivo en tracción para el cálculo de los rangos de tensión de fatiga, como se permite en el Artículo 6.6.1.2.1, y para la determinación de las tensiones de flexión en la sección compuesta debida a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II, como se permite en el Artículo 6.10.4.2.1.

Además de proveer en el tablero una cuantía de armadura longitudinal del 1 por ciento, para controlar la fisuración del tablero de hormigón se debería evitar la fluencia nominal de esta armadura bajo la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II (*Carskaddan 1980; AASHTO 1991; Grubb 1993*). Se puede considerar que el uso de armadura longitudinal en el tablero con una resistencia a la fluencia mínima especificada mayor o igual que 400 MPa evitará la fluencia nominal de la armadura longitudinal bajo esta combinación de cargas en los siguientes casos:

- Construcción no apuntalada en la cual la sección de acero tiene una resistencia mínima a la fluencia especificada menor o igual que 485 MPa en cualquiera de las alas, o
- Construcción apuntalada en la cual la sección de acero tiene una resistencia mínima a la fluencia especificada menor o igual que 345 MPa en cualquiera de las alas.

En estos casos se considera que los efectos de cualquier fluencia nominal de la armadura longitudinal son insignificantes. Caso contrario, el Ingeniero debería verificar que las cargas del Estado Límite de Servicio II aplicables no provoquen la fluencia nominal de la armadura longitudinal. Estas reglas se basan en el trabajo de *Carskaddan (1980)* y se aplican para elementos diseñados usando los requisitos del Artículo 6.10 o el Apéndice A, así como para elementos diseñados para redistribución de

momentos en las secciones sobre las pilas bajo la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II usando los requisitos del Apéndice B.

Siempre que sea posible, aproximadamente dos tercios de la armadura requerida se debería colocar en la capa superior. Cuando se utilizan paneles prefabricados como encofrados para el tablero, puede que no sea posible colocar la armadura longitudinal en dos capas. En estos casos, a criterio del Ingeniero se podrán obviar los requisitos sobre colocación.

6.10.1.8 Fractura de la sección neta

Al verificar los elementos flexionales en Estado Límite de Resistencia o para determinar su construibilidad, en todas las secciones transversales que contengan orificios en el ala de tracción se deberán satisfacer los siguientes requisitos adicionales:

$$f_t \leq 0.84 \left(\frac{A_n}{A_g} \right) F_u \leq F_{yt} \quad (6.10.1.8-1)$$

donde:

A_n = área neta del ala de tracción determinada como se especifica en el Artículo 6.8.3 (mm²)

A_g = área bruta del ala de tracción (mm²)

f_t = tensión sobre el área bruta del ala de tracción debida a las cargas mayoradas, calculada sin considerar la flexión lateral de las alas (MPa)

F_u = mínima resistencia a la tracción especificada del ala de tracción determinada como se especifica en la Tabla 6.4.1-1 (MPa)

C6.10.1.8

Si la Ecuación 1 se satisface bajo las condiciones indicadas en una sección transversal en la que el ala contiene orificios, entonces se evita la fractura de la sección neta del ala. En el caso que los orificios sean mayores que los que habitualmente se utilizan para colocar conectores tales como bulones ver el Artículo 6.8.1

En las secciones compuestas compactas en flexión positiva y en las secciones diseñadas de acuerdo con los requisitos opcionales del Apéndice A sin orificios en el ala de tracción, se permite que la resistencia nominal a la flexión sea mayor que el momento en primera fluencia en Estado Límite de Resistencia. Mientras se aguardan los resultados de investigaciones adicionales, de manera conservadora también se requiere que la Ecuación 1 se satisfaga en Estado Límite de Resistencia en cualquier sección transversal en la que el ala de tracción contenga orificios. Aún no se ha documentado exhaustivamente que en estas secciones se pueda producir la plastificación total de la sección transversal antes que se produzca la fractura de la sección neta del ala de tracción. Además, los requisitos para diseño de empalmes del Artículo 6.13.6.1.4 no consideran la contribución de una considerable fluencia del alma a la resistencia a la flexión de estas secciones. Probablemente la Ecuación 1 evitará que se ubiquen orificios en las alas de tracción en o cerca de los puntos de máximo momento aplicado cuando sea posible que ocurra fluencia significativa del alma, más allá de la fluencia localizada permitida en las secciones híbridas.

El factor 0.84 de la Ecuación 1 equivale aproximadamente a la relación entre el factor de resistencia para fractura de elementos traccionados, ϕ_u , y el factor de resistencia para fluencia de elementos traccionados, ϕ_y , especificados en el Artículo 6.5.4.2.

6.10.1.9 Resistencia al pandeo flexional del alma

6.10.1.9.1 Almas sin rigidizadores longitudinales

La resistencia nominal al pandeo flexional se deberá tomar como:

C6.10.1.9.1

En artículos posteriores la resistencia teórica al pandeo flexional del alma se verifica contra la máxima tensión en

$$F_{crw} = \frac{0.9Ek}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \quad (6.10.1.9.1-1)$$

pero no deberá ser mayor que el menor valor entre $R_h F_{yc}$ y $F_{yw}/0.7$.

donde:

k = coeficiente de pandeo flexional

$$= \frac{9}{(D_c/D)^2} \quad (6.10.1.9.1-2)$$

y donde:

D_c = profundidad del alma comprimida en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

R_h = factor de hibridez especificado en el Artículo 6.10.1.10.1

Si ambos bordes del alma están comprimidos k se deberá tomar igual a 7.2.

el ala de compresión debida a las cargas mayoradas, calculada sin considerar la flexión lateral de las alas. No se puede garantizar que diferenciando entre la tensión en el ala de compresión y la máxima tensión de compresión en el alma se obtenga una mayor precisión. El potencial uso de un valor de F_{crw} mayor que la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma, F_{yw} , en las secciones híbridas es justificado, ya que el ala tiende a restringir las deformaciones longitudinales asociadas con el pandeo flexional del alma para tensiones nominales en el ala de compresión de hasta $R_h F_{yc}$. Un ala de compresión estable nominalmente elástica restringe las deformaciones longitudinales y por flexión en el alma inelástica en la unión entre alma y ala (ASCE 1968). ASCE (1968) recomienda que dentro del contexto del pandeo flexional no es necesario considerar la fluencia temprana del alma en las secciones híbridas siempre que la esbeltez del alma no sea mayor que $5.87\sqrt{E/F_{yc}}$. Para las secciones híbridas en las cuales $F_{yw}/F_{yc} < 0.7$ estos requisitos adoptan un enfoque más conservador que el recomendado por ASCE (1968) limitando el valor de F_{crw} a $F_{yw}/0.7$. Con las ecuaciones para resistencia a la flexión de estas Especificaciones, se obtienen predicciones algo conservadoras para las resistencias de los elementos híbridos sin rigidizadores longitudinales ensayados por Lew y Toprac (1968) que tuvieron valores de D/t_w y $2D_c/t_w$ tan elevados como 305 y $F_{yw}/F_{yc} = 0.32$. Por lo tanto, no se necesitan requisitos adicionales en el Estado Límite de Resistencia para todos los valores potenciales de F_{yw}/F_{yc} asociados con los aceros especificados en el Artículo 6.4.1.

En numerosos ensayos experimentales se han observado deformaciones por flexión de la placa de alma a partir del momento en que se inicia la aplicación de las cargas, y éstas se producen como resultado de las imperfecciones geométricas iniciales del alma. Debido al comportamiento postpandeo estable del alma, no hay cambios significativos en la tasa de aumento de los desplazamientos transversales del alma en función de las cargas aplicadas cuando se excede la tensión teórica de pandeo flexional (Basler et al. 1960). Debido a la presencia inevitable de imperfecciones geométricas, el pandeo flexional del alma es más bien un problema que tiene que ver con la relación carga-deformación antes que con la bifurcación del equilibrio. En estas Especificaciones la carga teórica de pandeo del alma se utiliza como un índice sencillo para controlar las deformaciones por flexión de las placas de alma y los desplazamientos transversales.

Para una sección doble T simétrica sin rigidizadores de alma longitudinales, con la Ecuación 2 se obtiene $k = 36.0$, valor que es aproximadamente igual a $k_{ss} + 0.8(k_{sf} - k_{ss})$, donde $k_{ss} = 23.9$ y $k_{sf} = 39.6$ son los coeficientes de pandeo flexional para borde longitudinal simplemente apoyado y totalmente restringido,

respectivamente (*Timoshenko y Gere 1961*). Para las secciones doble Te en las cuales $D_c \neq D$, la Ecuación 2 proporciona una aproximación razonable de la resistencia teórica al pandeo flexional (*Galambos 1998*) consistente con lo anterior.

Para las secciones compuestas sujetas a flexión positiva, estas Especificaciones no requieren utilizar la Ecuación 1 una vez que la sección alcanza su condición compuesta final para almas que en base al Artículo 6.10.2.1.1 no requieren rigidizadores longitudinales. La sección se debe verificar para pandeo flexional del alma durante la etapa constructiva, mientras la sección se mantiene en condición no compuesta. Para cargas aplicadas en los estados límites de fatiga y servicio después que el tablero se haya endurecido o se haya vuelto compuesto, las mayores tensiones de compresión en el alma tienden a ser compensadas por el aumento de F_{crw} que se da como resultado de la correspondiente disminución de D_c . Esta compensación se mantiene en el Estado Límite de Resistencia. En base a los límites para el dimensionamiento de la sección especificados en el Artículo 6.10.2 y el requisito de ductilidad especificado en el Artículo 6.10.7.3, para estas secciones F_{crw} generalmente tiene un valor similar o mayor que F_{yc} en el Estado Límite de Resistencia.

Para las secciones compuestas en flexión positiva en las cuales en base al Artículo 6.10.2.1.1 no se requieren rigidizadores de alma longitudinales, el requisito sobre esbeltez del alma del Artículo 6.10.2.1.2 generalmente no es suficiente para garantizar que no habrá pandeo flexional teórico del alma. Por lo tanto, para estas secciones las Especificaciones exigen calcular R_b , tal como se discute luego en el Artículo C6.10.1.10.2.

Para las secciones compuestas en flexión negativa, D_c se debe calcular usando la sección consistente en la viga de acero más la armadura longitudinal del tablero, con una única excepción que es la que se indica en el Artículo D6.3.1 para el Estado Límite de Servicio. Este enfoque limita las potenciales complicaciones que podrían surgir posteriormente al determinar las capacidades de carga debido a que la resistencia a la flexión es función de D_c y D_c se toma como una función de la carga aplicada. Este enfoque lleva a un cálculo más conservador de la resistencia a la flexión, pero típicamente su influencia sobre la resistencia es insignificante.

Cerca de los puntos de contraflexión bajo carga permanente, cuando las tensiones en el acero y en las secciones compuestas debidas a momentos de signo opuesto son aditivas, es posible que ambos bordes del alma resulten comprimidos. En este caso el eje neutro está ubicado fuera del alma. Por lo tanto, cuando ambos bordes del alma están comprimidos las Especificaciones establecen que k se debe tomar igual a 7.2, valor aproximadamente

6.10.1.9.2 Almas con rigidizadores longitudinales

En ausencia de un análisis racional alternativo, la resistencia nominal al pandeo flexional se puede determinar como se especifica en la Ecuación 6.10.1.9.1-1, tomando el coeficiente de pandeo flexional de la siguiente manera:

- Si $\frac{d_s}{D_c} \geq 4$, entonces:

$$k = \frac{5.17}{(d_s/D)^2} \geq \frac{9}{(D_c/D)^2} \quad (6.10.1.9.2-1)$$

- Si $\frac{d_s}{D_c} < 4$, entonces:

$$k = \frac{11.64}{\left(\frac{D_c - d_s}{D}\right)^2} \quad (6.10.1.9.2-2)$$

donde:

d_s = distancia entre la línea de centro del rigidizador longitudinal más próximo, o desde la línea de sujetadores perpendicular a la dirección de la carga del rigidizador longitudinal más próximo, y la superficie interior o rama del ala comprimida (mm)

Si ambos bordes del alma están comprimidos k se deberá tomar igual a 7.2.

igual al coeficiente de pandeo flexional teórico para una placa bajo compresión uniforme suponiendo condiciones de borde longitudinal totalmente apoyado (*Timoshenko y Gere 1961*). Estos casos son relativamente raros y, cuando ocurren, en general las tensiones de compresión totales en el alma son pequeñas; no obstante, puede que en los software de cálculo sea necesario considerarlos.

C6.10.1.9.2

Con las Ecuaciones 1 y 2 se obtiene una aproximación razonable del coeficiente de pandeo flexional k para almas con un único rigidizador longitudinal en cualquier ubicación vertical (*Frank y Helwig 1995*). El valor de k resultante depende de la ubicación del rigidizador longitudinal del alma más próximo al ala comprimida con respecto a su ubicación óptima en $d_s/D_c = 0.4$ (*Vincent 1969*) y se utiliza para determinar la resistencia al pandeo flexional a partir de la Ecuación 6.10.1.9.1-1.

Las variaciones en el tamaño del ala hacen que D_c varíe a lo largo de la longitud de una viga. En las vigas compuestas D_c también depende de la carga aplicada. Si el rigidizador longitudinal está ubicado a una distancia fija del ala de compresión (caso más habitual), no es posible que el rigidizador esté en su ubicación óptima en toda la longitud de la viga. En las vigas compuestas con almas rigidizadas longitudinalmente sujetas a flexión positiva, D_c tiende a ser mayor para cargas en condición no compuesta durante la etapa constructiva y por lo tanto será necesario verificar el pandeo flexional del alma. Además, D_c puede ser lo suficientemente grande para la viga compuesta en el Estado Límite de Servicio como para que aún sea necesario verificar el pandeo flexional. Por lo tanto, el valor de D_c para verificar el pandeo flexional de estas secciones en las regiones de flexión positiva en el Estado Límite de Servicio se debe determinar en base a las tensiones de flexión acumuladas debidas a las cargas mayoradas, tal como se especifica en el Artículo D6.3.1.

Para las secciones compuestas en flexión negativa D_c se debe calcular de la misma manera que se discute en el Artículo C6.10.1.9.1

Las Ecuaciones 1 y 2 y la ubicación óptima del rigidizador con ellas asociada asumen en las alas condiciones de borde simplemente apoyado. Estas ecuaciones de k le permiten al Ingeniero calcular la resistencia al pandeo flexional del alma cualquiera sea la posición del rigidizador longitudinal con respecto a D_c . Si la distancia entre el rigidizador longitudinal más próximo y el ala de compresión, d_s , es menor que $0.4D_c$, el rigidizador está por encima de su ubicación óptima y habrá pandeo flexional del alma en el panel entre el rigidizador y el ala de tracción. Si d_s es mayor que $0.4D_c$ habrá pandeo flexional del alma en el panel entre el rigidizador y el ala de

compresión. Si d_s es igual a $0.4D_c$ el rigidizador se encuentra en su posición óptima y habrá pandeo flexional en ambos paneles. En este caso, para una viga simétrica, usando cualquiera de las dos ecuaciones se obtiene un valor de k igual a 129.3 (Dubas 1948). El Artículo C6.10.11.3.1 contiene información adicional respecto de la ubicación de los rigidizadores longitudinales en el alma.

Debido a que el pandeo flexional de un alma rigidizada longitudinalmente se debe investigar tanto para tensiones en condición compuesta como no compuesta en diferentes ubicaciones de la viga, es posible que para una condición determinada el rigidizador esté ubicado en una posición ineficiente y que por lo tanto el coeficiente de pandeo flexional sea pequeño. Como al desarrollar las Ecuaciones 1 y 2 se supusieron condiciones de borde simplemente apoyado, la resistencia al pandeo flexional del alma calculada para el alma rigidizada longitudinalmente puede ser menor que aquella calculada para un alma de las mismas dimensiones sin rigidizadores longitudinales en la cual se supone que las alas tienen algo de restricción contra la rotación. Para evitar esta anomalía, las Especificaciones indican que el valor de k para un alma rigidizada longitudinalmente obtenido mediante la Ecuación 1 debe ser mayor o igual que $9.0/(D_c/D)^2$, que es el valor de k para un alma sin rigidizadores longitudinales obtenido mediante la Ecuación 6.10.1.9.1-2 suponiendo restricción parcial contra la rotación de las alas. Observar que sólo es necesario verificar este límite cuando la Ecuación 1 es determinante.

Como se discute en mayor detalle en el Artículo C6.10.1.9.1, cuando ambos bordes del alma están comprimidos el coeficiente de pandeo flexional se toma igual a 7.2

Las Ecuaciones 1 y 2 no toman en cuenta el beneficio que representa colocar más de un rigidizador longitudinal en el alma. Por lo tanto, estas ecuaciones se pueden usar conservadoramente para las almas que tienen múltiples rigidizadores longitudinales. Alternativamente, está permitido que el Ingeniero determine F_{crw} de la Ecuación 6.10.1.9.1-1 o el correspondiente valor de k para utilizar en esta ecuación mediante un análisis de pandeo del panel del alma. Para este análisis, en las alas y en las ubicaciones de los rigidizadores se deberían suponer condiciones de borde simplemente apoyado.

6.10.1.10 Factores de reducción de la resistencia de las alas

6.10.1.10.1 Factor de hibridez, R_h

Para los perfiles laminados, las secciones armadas homogéneas y las secciones armadas con acero de mayor resistencia en el alma que en ambas alas, R_h se deberá tomar

C6.10.1.10.1

El factor R_h toma en cuenta la contribución reducida del alma a la resistencia nominal a la flexión después de la primera fluencia en cualquier elemento de ala, debido a que

igual a 1.0. Caso contrario, en ausencia de un análisis racional alternativo, el factor de hibridez se deberá tomar como:

$$R_h = \frac{12 + \beta(3\rho - \rho^3)}{12 + 2\beta} \quad (6.10.1.10.1-1)$$

donde:

$$\beta = \frac{2D_n t_w}{A_{fn}} \quad (6.10.1.10.1-2)$$

ρ = menor valor entre F_{yw} / f_n y 1.0

y donde:

A_{fn} = sumatoria del área del ala y el área de cualquier cubrejuntas del lado del eje neutro correspondiente a D_n (mm²). Para las secciones compuestas en flexión negativa, el área de la armadura longitudinal se puede incluir en el cálculo de A_{fn} para el ala superior.

D_n = mayor de las distancias entre el eje neutro elástico de la sección transversal y la cara interna de cualquiera de las alas (mm). Para las secciones en las cuales el eje neutro se encuentra a la mitad de la profundidad del alma, distancia desde el eje neutro hasta la cara interna del ala del lado del eje neutro en el cual ocurre la primera fluencia.

f_n = para las secciones en las cuales la primera fluencia ocurre en el ala, un cubrejuntas o la armadura longitudinal del lado del eje neutro correspondiente a D_n , la mayor de las mínimas resistencias a la fluencia especificadas de cada componente incluido en el cálculo de A_{fn} (MPa). Caso contrario, la mayor de las tensiones elásticas en el cubrejuntas o armadura longitudinal del lado del eje neutro correspondiente a D_n en primera fluencia del otro lado del eje neutro.

el acero de menor resistencia del alma de la sección híbrida entra en fluencia en forma más temprana. De acuerdo con el uso que se le da en el presente documento, elemento de ala se define como un ala o un cubrejuntas o la armadura longitudinal.

La Ecuación 1 representa una condensación de las fórmulas para R_h de anteriores ediciones de las Especificaciones AASHTO y considera todas las posibles combinaciones asociadas con diferentes posiciones del eje neutro elástico y diferentes resistencias a la fluencia de los elementos de ala superiores e inferiores. La ecuación fundamental, originalmente derivada para una sección doble Te con simetría doble (ASCE 1968; Schilling 1968; y Schilling y Frost 1964) ha sido adaptada en estos requisitos para abarcar secciones con simetría simple y compuestas concentrándose en el lado del eje neutro en el cual primero ocurre la fluencia. De este lado del eje neutro es donde ocurre la mayor fluencia del alma antes de la primera fluencia de cualquier elemento de ala. Conservadoramente, se supone que todos los elementos de ala de este lado del eje neutro están ubicados en el borde del alma. La ecuación también se adaptó suponiendo que el corrimiento del eje neutro debido al inicio de la fluencia del alma es despreciable. Estas hipótesis son similares a las que se usaron en ediciones anteriores de las Especificaciones AASHTO para desarrollar una ecuación separada para R_h para elementos compuestos. En lugar de utilizar la Ecuación aproximada 1, el Ingeniero puede determinar R_h en base a un análisis iterativo de compatibilidad de deformaciones. Debido a típicamente que los valores de R_h calculados mediante cualquiera de los enfoques son próximos a 1.0, las hipótesis conservadores adoptadas al determinar la Ecuación 1 no iterativa no deberían resultar en una fuerte penalización económica.

Para las secciones compuestas en flexión positiva D_n se puede tomar conservadoramente como la distancia desde el eje neutro de la sección compuesta a corto plazo hasta la cara interna del ala inferior. Se recomienda fuertemente utilizar este enfoque para así evitar posibles complicaciones que podrían surgir posteriormente al determinar la capacidad de carga como consecuencia de que la resistencia a la flexión es función de D_n y D_n es función de la carga aplicada.

Para las secciones compuestas en las cuales el eje neutro se encuentra a la mitad de la profundidad del alma y donde la primera fluencia ocurre simultáneamente en ambos elementos de ala, D_n se debería tomar como la distancia al elemento de ala con el menor A_{fn} .

6.10.1.10.2 Factor de balanceo de las cargas, R_b

Al verificar la construibilidad de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.3.2, o cuando:

C6.10.1.10.2

El término R_b es un factor de reducción de la resistencia postpandeo que toma en cuenta la variación no lineal de las

- la sección es compuesta y está en flexión positiva y el alma satisface los requisitos del Artículo 6.10.2.1.1,

o bien:

- se proveen uno o más rigidizadores longitudinales y

$$\frac{D}{t_w} \leq 0.95 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yc}}} \quad (6.10.1.10.2-1)$$

o bien:

$$\frac{2D_c}{t_w} \leq \lambda_{rw} \quad (6.10.1.10.2-2)$$

Entonces R_b se deberá tomar igual a 1.0.

Caso contrario:

$$R_b = 1 - \left(\frac{a_{wc}}{1200 + 300a_{wc}} \right) \left(\frac{2D_c}{t_w} - \lambda_{rw} \right) \leq 1.0 \quad (6.10.1.10.2-3)$$

donde:

$$\begin{aligned} \lambda_{rw} &= \text{relación de esbeltez límite para un alma no compacta} \\ &= 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \end{aligned} \quad (6.10.1.10.2-4)$$

a_w = para todas las secciones salvo las indicadas a continuación, relación entre dos veces el área del alma comprimida y el área del ala de compresión

$$= \frac{2D_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \quad (6.10.1.10.2-5)$$

para secciones rigidizadas longitudinalmente en flexión positiva

$$= \frac{2D_c t_w}{b_{fc} t_{fc} + b_s t_s (1 - f_{DCI} / F_{yc}) / 3n} \quad (6.10.1.10.2-6)$$

donde:

b_s = ancho efectivo del tablero de hormigón (mm)

f_{DCI} = tensión en el ala de compresión en la sección considerada, calculada sin considerar la flexión

tensiones luego del pandeo flexional localizado en las almas esbeltas. Este factor considera la reducción de la resistencia a la flexión de la sección que ocurre cuando un alma esbelta reparte las tensiones de compresión y en consecuencia aumenta la tensión de flexión en el ala de compresión. El factor R_b dado por la Ecuación 3 se basa en exhaustivos estudios experimentales y teóricos (Galambos 1998) y es la más refinada de las dos ecuaciones desarrolladas por Basler y Thurlimann (1961). El factor R_b no se aplica al determinar la resistencia nominal a la flexión del ala traccionada, ya que al repartir las tensiones de compresión del alma no aumenta significativamente la tensión en el ala traccionada (Basler y Thurlimann 1961).

Al calcular la resistencia nominal a la flexión del ala de compresión para verificar la construibilidad de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.3.2 R_b siempre se toma igual a 1.0. En estas Especificaciones esta condición se asegura para todas las secciones de alma esbelta limitando las tensiones flexionales del ala de compresión bajo las cargas mayoradas durante la etapa constructiva a la resistencia al pandeo elástico del alma, F_{crw} .

Para las secciones compuestas en flexión positiva en el estado límite de resistencia, R_b generalmente es igual o próximo a 1.0 si las secciones satisfacen los requisitos de los Artículos 6.10.2.2 y 6.10.7.3, siempre que también se satisfagan los requisitos del Artículo 6.10.2.1.1 de manera que no se requieran rigidizadores longitudinales. Esto es particularmente válido cuando se toma un área transformada del tablero de hormigón como parte del área del ala de compresión como se hace en la Ecuación 6. Por lo tanto, para estas secciones la reducción de la resistencia a la flexión debida al pandeo flexional del alma es nula o despreciable y R_b simplemente se toma igual a 1.0.

Para las secciones en flexión positiva o negativa con uno o más rigidizadores longitudinales en el alma y que satisfacen la Ecuación 1, R_b se toma igual a 1.0. Para estas secciones la esbeltez del alma, D/t_w , es menor o igual que el valor para el cual la tensión teórica de pandeo flexional en el Estado Límite de Resistencia es igual a F_{yc} . Para una viga doblemente simétrica, es decir para $D_c = 0.5D$, que tiene un único rigidizador longitudinal en el alma ubicado en su posición óptima, dependiendo del grado del acero utilizado, este límite tiene los siguientes valores:

lateral del ala y provocada por la carga permanente mayorada aplicada antes que el tablero se haya endurecido o se haya vuelto compuesto (MPa)

k = coeficiente de pandeo flexional para almas con rigidizadores longitudinales determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.9.2

n = relación de módulos determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.1b

t_s = espesor del tablero de hormigón (mm)

D_c = profundidad del alma comprimida en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

Tabla C6.10.1.10.2-1 Relación de esbeltez límite para $R_b = 1.0$ en una viga rigidizada longitudinalmente con el rigidizador en la ubicación óptima y $D_c/D = 0.5$

| F_{yc} (MPa) | $0.95 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yc}}}$ |
|----------------|---------------------------------|
| 250 | 300 |
| 345 | 260 |
| 485 | 220 |
| 620 | 194 |
| 690 | 184 |

Para las vigas monosimétricas con $D_c/D > 0.5$ y/o en las cuales no hay un único rigidizador longitudinal ubicado en su posición óptima, el valor de D/t_w limitante de la Ecuación 1 en general será menor que el valor indicado en la Tabla C1.

Para las secciones compuestas en regiones de flexión positiva, típicamente el tablero de hormigón contribuye una parte importante de la resistencia a la flexión como un elemento de ala de compresión. En el caso de las secciones de este tipo rigidizadas longitudinalmente, la Ecuación 6 toma en cuenta esta contribución conservadoramente en el cálculo de R_b incluyendo una fracción del área transformada del tablero en base a la sección correspondiente a $3n$ junto con el área de acero del ala de compresión al calcular el término a_{wc} . Para la Ecuación 6 D_c se deberá calcular como se especifica en el Artículo D6.3.1 para secciones compuestas en flexión positiva y es función de las cargas aplicadas. La relación entre la posición del rigidizador longitudinal y D_c y el efecto resultante sobre el coeficiente de pandeo flexional del alma, k , se discute en mayor detalle en los Artículos C6.10.1.9.2 y C6.10.11.3.1. En general, para el diseño preliminar de las secciones de este tipo rigidizadas longitudinalmente en las cuales se anticipa que R_b será menor que 1.0, se puede asumir un valor de R_b comprendido entre 0.85 y 0.95. Los elementos con relaciones carga permanente/sobrecarga más elevadas tenderán a caer en el extremo inferior de este rango. Este valor preliminar de R_b se puede refinar más adelante durante el diseño usando la Ecuación 3. En los casos en los cuales para estas secciones R_b es igual a 1.0, se evitan las potenciales complicaciones que podrían surgir posteriormente al determinar la capacidad de carga debido al hecho de que de la resistencia a la flexión es función de D_c y que D_c depende de la carga aplicada.

La Ecuación 1 ignora los efectos beneficiosos que se logran al colocar más de un rigidizador longitudinal en el alma. Cuando las almas tienen más de un rigidizador

longitudinal, la viga se puede dimensionar para $R_b = 1.0$ si F_{crw} determinado mediante un análisis racional alternativo realizado como se especifica en el Artículo C10.1.9.2 es mayor o igual que F_{yc} .

Los requisitos para el dimensionamiento de los rigidizadores longitudinales indicados en el Artículo 6.10.11.3 aseguran que se pueda desarrollar la resistencia al pandeo flexional del alma especificada en el Artículo 6.10.1.9. En estas especificaciones el pandeo flexional de las almas rigidizadas longitudinalmente no está permitido en el Estado Límite de Servicio, pero sí en el Estado Límite de Resistencia. Los requisitos para el dimensionamiento de los rigidizadores no aseguran que se mantendrá una línea horizontal de flecha prácticamente nula luego del pandeo flexional del alma (*Galambos 1998*). Por lo tanto, al calcular el factor R_b para almas rigidizadas longitudinalmente en regiones de flexión positiva o negativa en Estado Límite de Resistencia se ignora la presencia de rigidizadores longitudinales.

Para las secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas que satisfacen la Ecuación 2, R_b también se toma igual a 1.0 debido a que la esbeltez del alma, $2D_c/t_w$, es menor o igual que el valor para el cual la tensión teórica de pandeo flexional elástico es igual a F_{yc} en el Estado Límite de Resistencia. La Ecuación 2 también define el límite de esbeltez para un alma no compacta. Las almas cuyas relaciones de esbeltez son mayores que el valor dado por la Ecuación 2 se denominan esbeltas. La siguiente tabla indica este límite de esbeltez para diferentes grados de acero:

Tabla C6.10.1.10.2-2 Relación de esbeltez límite para un alma no compacta y $R_b = 1.0$ en vigas sin rigidizadores de alma longitudinales

| F_{yc} (MPa) | λ_{tw} |
|----------------|----------------|
| 250 | 162 |
| 345 | 137 |
| 485 | 116 |
| 620 | 102 |
| 690 | 97 |

Las Especificaciones anteriores definían a las secciones como compactas o no compactas y no diferenciaban explícitamente entre un alma no compacta y un alma esbelta. Se debería observar que estas clasificaciones del alma se aplican solamente al caso de secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas.

Para el diseño preliminar de las secciones de alma esbelta sin rigidizadores longitudinales, típicamente se puede suponer un valor de R_b comprendido entre 0.9 y 1.0,

dependiendo de un valor de $2D_c/t_w$ estimado en relación con el valor límite aplicable indicado en la Tabla C2. Típicamente, para las secciones de alma esbelta rigidizadas longitudinalmente se debería asumir un valor entre 0.85 y 0.95 cuando se anticipa que las secciones tendrán valores de D/t_w que no satisfarán la Ecuación 1. Este valor preliminar de R_b se puede refinar posteriormente usando la Ecuación 3.

Por los motivos discutidos en el Artículo C6.10.1.9.1, al determinar R_b para secciones compuestas en flexión negativa, D_c se debe calcular para la sección formada por la viga de acero más la armadura longitudinal del tablero.

El factor 5.7 que aparece en la Ecuación 4 se basa en un coeficiente de pandeo flexional $k = 36.0$, que es aproximadamente igual a $k_{ss} + 0.8 (k_{sf} - k_{ss})$, donde $k_{ss} = 23.9$ y $k_{sf} = 39.6$ son los coeficientes de pandeo flexional para condiciones de borde simplemente apoyado y totalmente restringido, respectivamente, en almas sin rigidizadores longitudinales (*Timoshenko y Gere 1961*).

En el caso de las alas de compresión que utilizan cubrejuntas, en el denominador de la Ecuación 5 se puede sumar el área de los cubrejuntas al área de las alas, $b_{fc}t_{fc}$.

Aunque es posible utilizar la tensión real que las cargas mayoradas producen en las alas de compresión, f_{bu} , calculada sin considerar la flexión lateral de las alas, no es probable que para F_{yc} en las Ecuaciones 1, 4 y 6 este refinamiento resulte en un aumento significativo del valor de R_b . Usar la tensión real en las alas para calcular la resistencia a la flexión también podría ocasionar potenciales dificultades luego al calcular la capacidad de carga, ya que en este caso la resistencia a la flexión se volvería una función de la carga aplicada. Si para una sección en la cual la resistencia nominal a la flexión del ala de compresión es significativamente menor que F_{yc} se desea un valor de R_b mayor, una alternativa preferida consiste en sustituir F_{yc} en las Ecuaciones 1, 4 y 6 según corresponda por el menor de los siguientes valores: (1) la resistencia nominal a la flexión del ala de compresión, F_{nc} , calculada suponiendo que R_b y R_h son iguales a 1.0, o bien (2) la tensión elástica nominal en el ala de compresión cuando el ala de tracción alcanza una tensión elástica nominal igual a $R_h F_{yt}$. Esto es similar al enfoque adoptado por AISC (1999).

6.10.2 Límites aplicables a las dimensiones de la sección transversal

6.10.2.1 Proporciones del alma

6.10.2.1.1 Almas sin rigidizadores longitudinales

Las almas se deberán dimensionar de manera que:

C6.10.2.1.1

En la práctica, la Ecuación 1 representa un límite superior para la esbeltez de las almas sin rigidizadores longitudinales, expresado en términos de la profundidad del

$$\frac{D}{t_w} \leq 150$$

(6.10.2.1.1-1)

alma, D . Esta ecuación hace que en la etapa de diseño preliminar dimensionar el alma sea más simple que de acuerdo con las Especificaciones anteriores. En las Especificaciones anteriores, la Ecuación 1 era el límite superior para almas no rigidizadas. Limitando la esbeltez de las almas rigidizadas transversalmente a este valor, para las vigas rectas también se permite una máxima separación entre rigidizadores transversales de hasta $3D$. Además, se ha eliminado el requisito incluido en las Especificaciones anteriores que establecía la necesidad de proveer rigidizadores transversales adicionales a los requeridos para corte para poder manipular las vigas de almas más esbeltas. Asimismo, satisfacer la Ecuación 1 permite despreciar el pandeo flexional del alma al diseñar secciones compuestas en flexión positiva, tal como se discute con mayor detalle en el Artículo C6.10.1.9.1. El límite impuesto por la Ecuación 1 es válido para secciones con resistencias mínimas a la fluencia especificadas menores o iguales que 690 MPa diseñadas conforme a estas Especificaciones.

Estas Especificaciones no consideran las ecuaciones del estado límite correspondiente a pandeo vertical de las alas de AISC (1999), las cuales en gran parte se basan en ASCE (1968). Estas ecuaciones especifican un límite para la esbeltez del alma a fin de evitar el pandeo elástico teórico del alma como una columna sujeta a una compresión transversal radial debida a la curvatura de las alas. Para las vigas que satisfacen la Ecuación 1, a menos que F_{yc} sea mayor que 585 MPa, estas ecuaciones no determinan la esbeltez del alma. Además, ensayos realizados por Lew y Toprac (1968), Cooper (1967) y otros investigadores, en los cuales el modo de falla final involucraba el pandeo vertical de las alas, o bien un plegamiento del ala de compresión en sentido vertical hacia el alma, indican que la influencia de este modo de falla sobre las resistencias a flexión anticipadas para la viga es pequeña. Esto es válido incluso para vigas con parámetros que violan significativamente las ecuaciones del estado límite correspondiente a pandeo vertical de las alas.

6.10.2.1.2 Almas con rigidizadores longitudinales

C6.10.2.1.2

Las almas se deberán dimensionar de manera que:

$$\frac{D}{t_w} \leq 300$$

(6.10.2.1.2-1)

En la práctica, la Ecuación 1 representa un límite superior para la esbeltez de las almas con rigidizadores longitudinales, expresado en términos de la profundidad del alma, D . Esta ecuación hace que en la etapa de diseño preliminar dimensionar el alma sea más simple que de acuerdo con las Especificaciones anteriores. El límite impuesto por la Ecuación 1 es válido para secciones con resistencias mínimas a la fluencia especificadas menores o iguales que 690 MPa diseñadas conforme a estas Especificaciones.

Cooper (1967) discute el conservadurismo de las ecuaciones del estado límite correspondiente a pandeo

vertical de las alas y la justificación detrás de la no consideración de este estado límite en las vigas doble Te rigidizadas longitudinalmente. Ensayos realizados por Cooper (1967), Owen et al. (1970) y otros investigadores demostraron que los modos de falla finales que involucran el pandeo vertical de las alas no afecta negativamente la resistencia a la flexión, incluso para vigas rigidizadas longitudinalmente que superan el límite de la Ecuación 1. En todos los casos que involucran el tipo de falla por pandeo vertical de las alas, la falla es precedida por un importante grado de fluencia por flexión del ala de compresión

6.10.2.2 Proporciones de las alas

Las alas de compresión y tracción se deberán diseñar de manera que:

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 12.0 \quad (6.10.2.2-1)$$

$$b_f \geq D/6 \quad (6.10.2.2-2)$$

$$t_f \geq 1.1t_w \quad (6.10.2.2-3)$$

y

$$0.1 \leq \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 10 \quad (6.10.2.2-4)$$

donde:

I_{yc} = momento de inercia del ala de compresión de la sección de acero respecto del eje vertical en el plano del alma (mm^4)

I_{yt} = momento de inercia del ala de tracción de la sección de acero respecto del eje vertical en el plano del alma (mm^4)

C6.10.2.2

La Ecuación 1 es un límite práctico que asegura que el ala no se distorsionará excesivamente al soldarla al alma.

White y Barth (1998) observaron que la relación de aspecto de la sección transversal D/b_f es un parámetro significativo que afecta la resistencia y características de la relación momento-rotación de las secciones doble Te. La Ecuación 2 limita esta relación a un valor máximo de 6. No hay datos experimentales disponibles para secciones de ala muy angosta. Un número significativo de la limitada cantidad de ensayos que se han realizado indican resistencias nominales a flexión y corte relativamente bajas con respecto a los valores determinados usando estas y las anteriores Especificaciones. Limitar esta relación a un valor máximo de 6 tanto para alas de compresión como para alas de tracción asegura que, si la sección a lo largo de todo el panel está dimensionada de manera de satisfacer la Ecuación 6.10.9.3.2-1, los paneles interiores del alma rigidizados puedan desarrollar resistencia al corte postpandeo debido a la acción del campo de tensiones (White 2004).

La Ecuación 3 asegura que las alas proporcionarán algo de restricción contra el pandeo por corte del alma, y también que las condiciones de borde supuestas en las uniones alma-ala en las fórmulas de pandeo flexional del alma y pandeo local del ala de compresión incluidas en estas Especificaciones sean lo suficientemente precisas. Para los elementos que satisfacen las Ecuaciones 2 y 3 la relación entre el área del alma y el área del ala de compresión es siempre menor o igual que 5.45. Por lo tanto, no es necesario considerar el límite de 10 que AISC (1999) establece para esta relación.

Una sección doble Te con una relación I_{yc}/I_{yt} fuera de los límites especificados en la Ecuación 4 es más parecida a una sección Te con su centro de corte ubicado en la intersección del ala mayor y el alma. Los límites de la Ecuación 4 son similares a los límites especificados en ediciones anteriores de las Especificaciones, pero son más fáciles de aplicar ya que se basan en la relación entre I_{yc} e I_{yt}

en lugar del momento de inercia de la totalidad de la sección de acero, I_y . La Ecuación 4 asegura unas proporciones más eficientes para las alas y evita el uso de secciones que podrían ser particularmente difíciles de manipular durante las etapas constructivas. Además, la Ecuación 4 asegura la validez de las ecuaciones para $C_b > 1$ en casos que involucran gradientes de momento. Asimismo, estos límites tienden a evitar el uso de secciones extremadamente monosimétricas en las cuales el mayor de los momentos de fluencia, M_{yc} o M_{yt} , puede ser mayor que el momento plástico, M_p . Si las alas están compuestas por placas de igual espesor, estos límites equivalen a $b_{fc} \geq 0.46 b_{ft}$ y $b_{fc} \leq 2.15 b_{ft}$.

La popularización del diseño compuesto ha llevado a una considerable reducción del tamaño de las alas de compresión en las regiones de flexión positiva. Durante el diseño preliminar, además de satisfacer las limitaciones indicadas en este artículo, en estas regiones el ancho mínimo del ala de compresión también se debería establecer en base al lineamiento sobre L/b_{fc} sugerido en la Ecuación C6.10.3.4-1.

6.10.3 Construibilidad

6.10.3.1 Disposiciones generales

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 2.5.3. Además de proveer una resistencia adecuada, no estará permitido que los elementos portantes principales alcancen la fluencia nominal ni confiar en la resistencia post-pandeo durante las etapas críticas de la construcción, a excepción de la fluencia del alma de las secciones híbridas. Para esto se deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.10.3.2 y 6.10.3.3 durante cada una de las etapas críticas de la construcción. Para las secciones en flexión positiva que son compuestas en su condición final pero no compuestas durante su construcción se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.3.4.

Para investigar la construibilidad de los elementos solicitados a flexión todas las cargas se deberán mayorar tal como se especifica en el Artículo 3.4.2. Para el cálculo de las deflexiones los factores de carga se deberán tomar iguales a 1.0.

Se deberán investigar potenciales fuerzas de levantamiento en los apoyos en cada una de las etapas críticas de la construcción.

Las almas sin rigidizadores de apoyo en las ubicaciones sujetas a cargas concentradas no transmitidas a través del tablero o del sistema de tablero deberán satisfacer los requisitos del Artículo D6.5.

Si en la sección considerada hay orificios en el ala de tracción, el ala de tracción también deberá satisfacer el requisito especificado en el Artículo 6.10.1.8.

Las conexiones abulonadas portantes ya sea en un

C6.10.3.1

Si se anticipa que durante cualquiera de las etapas constructivas habrá fuerzas de levantamiento, estará permitido colocar una carga temporaria para contrarrestarlas. La magnitud y ubicación de cualquier carga temporaria requerida debe estar indicada en la documentación técnica.

Para asegurar que se mantenga la correcta geometría de la estructura, en las uniones abulonadas de alta resistencia de los elementos portantes las fuerzas mayoradas están limitadas a la resistencia al deslizamiento de la conexión durante cada una de las etapas críticas de la construcción.

elemento solicitado a flexión o entre diferentes elementos solicitados a flexión se deberán dimensionar de manera de evitar el deslizamiento bajo las cargas mayoradas correspondientes a cada etapa crítica de la construcción. Para investigar la resistencia al deslizamiento se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.13.2.8.

6.10.3.2 Flexión

6.10.3.2.1 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a compresión

Para las etapas críticas de la construcción se deberán satisfacer cada uno de los requisitos siguientes. Para las secciones de alma esbelta no será necesario verificar la Ecuación 1 si f_ℓ es igual a cero. Para las secciones con almas compactas o no compactas no será necesario verificar la Ecuación 3.

$$f_{bu} + f_\ell \leq \phi_f R_h F_{yc} \quad (6.10.3.2.1-1)$$

$$f_{bu} + \frac{1}{3} f_\ell \leq \phi_f F_{nc} \quad (6.10.3.2.1-2)$$

y

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{crw} \quad (6.10.3.2.1-3)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_{bu} = tensión en el ala calculada sin considerar la flexión lateral del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

f_ℓ = tensión de flexión lateral del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

F_{crw} = resistencia nominal al pandeo flexional del alma especificada en el Artículo 6.10.1.9 (MPa)

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión del ala (MPa). F_{nc} se deberá determinar como se especifica en el Artículo 6.10.8.2. Para las secciones con almas compactas o no compactas, la resistencia al pandeo lateral torsional se puede tomar como M_{nc} determinado como se especifica en el Artículo A6.3.3 dividido por S_{xc} . Al calcular F_{nc} con el propósito de determinar la construibilidad el factor de balanceo de las cargas, R_b , se deberá tomar igual a 1.0.

C6.10.3.2.1

Se distingue entre alas de compresión y tracción con arriostramiento discreto o continuo debido a que para las alas con arriostramiento continuo no es necesario considerar la flexión lateral de las alas.

Este artículo especifica requisitos de construibilidad para alas de compresión con arriostramiento discreto, los cuales se expresan mediante las Ecuaciones 1, 2 y 3 en función de la combinación de las tensiones de flexión mayoradas que actúan durante la construcción. Al realizar estas verificaciones las tensiones f_{bu} y f_ℓ se deben determinar de acuerdo con los procedimientos especificados en el Artículo 6.10.1.6.

La Ecuación 1 asegura que la máxima tensión combinada en el ala de compresión no supere la resistencia mínima a la fluencia especificada del ala multiplicada por el factor de hibridez. En otras palabras, se trata de una verificación del Estado Límite de Fluencia.

La Ecuación 2 asegura que el elemento tenga suficiente resistencia con respecto a los estados límites basados en el pandeo lateral torsional y el pandeo local de las alas, incluyendo la consideración de la flexión lateral de las alas cuando se anticipa que estos efectos serán significativos.

La Ecuación 3 asegura que durante la construcción no ocurrirá el pandeo flexional teórico del alma.

La Ecuación 2 considera el ala de compresión como una viga-columna equivalente. Esta ecuación es en realidad una ecuación de interacción para vigas-columnas, expresada en función de las tensiones de las alas calculadas a partir de un análisis elástico (White 2004). El término f_{bu} es análogo a la carga axial, mientras que el término f_ℓ es análogo al momento flector en de la viga-columna equivalente. El factor 1/3 delante del término f_ℓ de la Ecuación 2 permite obtener una aproximación lineal precisa de la resistencia de la viga-columna equivalente dentro de los límites especificados en el Artículo 6.10.1.6 con relación a f_ℓ .

A menudo la Ecuación 1 prevalece sobre la Ecuación 2, especialmente para vigas con f_ℓ elevada y para los elementos con almas compactas o no compactas. Sin embargo, para los elementos con alas no compactas o que durante la construcción presentan grandes longitudes sin apoyo en combinación con valores de f_ℓ pequeños o nulos,

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_h = factor de hibridez especificado en el Artículo 6.10.1.10.1

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm³)

generalmente la Ecuación 2 será determinante. Las definiciones de alma compacta, no compacta y esbelta se discuten en el Artículo C6.10.2.3. Para realizar estas verificaciones con la sección en su condición no compuesta, la clasificación del alma se deberá basar en las propiedades de la sección no compuesta. Los significados asignados a las clasificaciones de ala compacta y no compacta se discuten en el Artículo C6.10.8.2.2. Cuando $f_t = 0$, la Ecuación 1 no será determinante por lo cual no será necesario verificarla en el caso de las secciones de alma esbelta. Esta ecuación sí se debería verificar en el caso de las secciones con almas compactas o no compactas. Sin embargo, el pandeo flexional del alma no es una consideración para estos tipos de elementos y, por lo tanto, para estas secciones en realidad no es necesario verificar la Ecuación 3.

Al verificar la Ecuación 2 para secciones con almas compactas o no compactas, la resistencia al pandeo lateral torsional del ala se puede determinar a partir de los requisitos del Artículo A6.3.3, los cuales consideran la contribución de la torsión de Saint-Venant. Esto puede ser útil para secciones con almas compactas o no compactas con grandes longitudes no apoyadas, si es que se requiere resistencia al pandeo lateral torsional adicional más allá de la calculada en base a los requisitos del Artículo 6.10.8.2. La resistencia al pandeo lateral torsional resultante, M_{nc} , luego se divide por S_{xc} para expresar la resistencia en términos de tensiones para su aplicación directa en la Ecuación 2. En algunos casos la resistencia calculada será mayor que F_{yc} debido a que el Apéndice A toma en cuenta en general resistencias a la flexión mayores que la resistencia al momento de fluencia, M_{yc} o M_{yt} . Sin embargo, en estos casos la Ecuación 1 será determinante, asegurando así que durante la construcción la tensión combinada mayorada en el ala no será mayor que F_{yc} multiplicada por el factor de hibridez.

En el Artículo CA6.1.1 se discute la lógica en la cual se basa el cálculo de S_{xc} , tal como se define en este Artículo para utilizar en la determinación de F_{nc} para secciones con almas no compactas o compactas.

Para las secciones que en su condición final son compuestas pero que durante la etapa constructiva no lo son, es necesario calcular diferentes valores del factor de hibridez, R_h , para realizar las verificaciones considerando al elemento como no compuesto y también considerando al elemento como compuesto.

Debido a que de acuerdo con la Ecuación 3 la tensión del ala se limita a la tensión de pandeo flexional del alma, al calcular la resistencia nominal a la flexión del ala de compresión en base a los requisitos de construibilidad el factor R_b siempre se debe tomar igual a 1.0.

En caso que la resistencia al pandeo flexional del alma sea superada durante la etapa constructiva, hay varias

opciones que el Ingeniero puede considerar. Estas opciones incluyen proveer un ala de compresión de mayor tamaño o un ala de tracción de menor tamaño de manera de disminuir la profundidad comprimida del alma, modificar la secuencia de colocación del tablero de manera de reducir la tensión de compresión en el alma, o proveer un alma de mayor espesor. Si ninguna de estas opciones resulta práctica o efectiva desde el punto de vista de sus costos, también se puede utilizar un rigidizador longitudinal en el alma. Tal como se especifica en el Artículo 6.10.11.3.1, el rigidizador longitudinal se debe ubicar de manera que durante la etapa constructiva se satisfaga la Ecuación 3, que en el Estado Límite de Servicio se satisfaga la Ecuación 6.10.4.2.2-4, y que en el Estado Límite de Resistencia se satisfagan todos los requisitos de diseño aplicables. El Artículo C6.10.11.3.1 contiene una discusión adicional sobre los procedimientos para definir la ubicación de los rigidizadores longitudinales.

6.10.3.2.2 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a tracción

Para las etapas críticas de la construcción, se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} + f_{\ell} \leq \phi_f R_h F_{yt} \quad (6.10.3.2.2-1)$$

6.10.3.2.3 Alas con apoyo lateral continuo solicitadas a tracción o compresión

Para las etapas críticas de la construcción, se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} \leq \phi_f R_h F_{yf} \quad (6.10.3.2.3-1)$$

Para las secciones no compuestas con almas delgadas, las alas solicitadas a compresión también deberán satisfacer la Ecuación 6.10.3.2.1-3.

C6.10.3.2.2

Para el caso de un ala con arriostramiento discreto solicitada a tracción, la Ecuación 1 asegura que durante la etapa constructiva, bajo la combinación de las tensiones mayoradas de flexión respecto del eje mayor y flexión lateral, la tensión en el ala no supere la resistencia mínima a la fluencia especificada multiplicada por el factor de hibridez.

C6.10.3.2.3

Este artículo asume que un ala con apoyo lateral continuo solicitada a compresión no está sujeta a pandeo local o lateral torsional. El Artículo C6.10.1.6 establece las condiciones bajo las cuales se puede considerar que un ala tiene apoyo lateral continuo. Al revestir el ala de hormigón o al unir el ala al tablero de hormigón mediante conectores de corte que satisfacen los requisitos del Artículo 6.10.10 se evita que un lado del ala sufra pandeo local o bien se obliga a que ambos lados del ala pandeen en la dirección opuesta al tablero de hormigón. Esto significa que se imponen condiciones de borde muy restrictivas en las uniones entre el alma y las alas. Además, el tablero de hormigón es efectivo para evitar las deformaciones por flexión lateral de las alas, las cuales se necesitan para que ocurra la significativa reducción de la resistencia asociada con el pandeo local de las alas. Por lo tanto, para las alas de compresión que satisfacen las limitaciones referentes a las proporciones especificadas en el Artículo 6.10.2.2 y que tienen apoyo lateral continuo de acuerdo con las condiciones especificadas en el Artículo C6.10.1.6 no es

6.10.3.2.4 Tablero de hormigón

Durante las etapas críticas de la construcción la tensión de tracción longitudinal en un tablero compuesto de hormigón debida a las cargas mayoradas no deberá ser mayor que ϕf_r , a menos que se provea armadura longitudinal de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.1.7. La tensión del hormigón se deberá determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.1.1d. f_r se deberá tomar como el módulo de rotura del hormigón determinado como se especifica en el Artículo 5.4.2.6 y ϕ se deberá tomar como el factor de resistencia apropiado para tracción del hormigón especificado en el Artículo 5.5.4.2.1.

6.10.3.3 Corte

Los paneles interiores de las almas con rigidizadores transversales, con o sin rigidizadores longitudinales, deberán satisfacer el siguiente requisito durante las etapas críticas de la construcción:

$$V_u \leq \phi_v V_{cr} \quad (6.10.3.3-1)$$

donde:

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

V_u = corte en el alma en la sección considerada debido a las cargas permanentes mayoradas y las cargas constructivas mayoradas aplicadas a la sección no compuesta (N)

V_{cr} = resistencia al pandeo por corte determinada a partir de la Ecuación 6.10.9.3.3-1 (N)

necesario verificar ni el pandeo local ni el pandeo lateral torsional de las alas.

C6.10.3.2.4

Este artículo pretende fundamentalmente ocuparse de la situación que ocurre cuando se coloca el tablero de hormigón en un tramo adyacente a un tramo en el cual el hormigón ya ha sido colocado. El momento negativo en el tramo adyacente provoca tensiones de tracción en el hormigón previamente colocado. Además, si se colocan tramos largos de manera que la primera colocación incluya una región de momento negativo, es posible que el hormigón en esta región esté traccionado durante el resto de la etapa de colocación del tablero, lo cual puede provocar la fisuración anticipada del mismo. Si la tensión de tracción longitudinal en el tablero supera el módulo de rotura mayorado del hormigón, se debe proveer armadura longitudinal de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.1.7 a fin de controlar la fisuración. Las tensiones en el tablero de hormigón se deben calcular usando la relación de módulos a corto plazo, n , de conformidad con el Artículo 6.10.1.1.1d.

C6.10.3.3

El alma se debe investigar para la sumatoria de las cargas permanentes mayoradas y las cargas constructivas mayoradas aplicadas a la sección no compuesta durante la etapa constructiva. Para esta verificación, la resistencia nominal al corte se limita a la resistencia a la fluencia por corte o a la resistencia al pandeo por corte de acuerdo con la Ecuación 6.10.9.3.3-1. Durante la etapa constructiva, bajo estas cargas no está permitido usar la acción del campo de tensiones según la Ecuación 6.10.9.3.2-2. La acción del campo de tensiones se puede usar una vez que el tablero se ha endurecido o se ha vuelto compuesto, siempre que la sección a lo largo de la totalidad del panel se haya dimensionado de manera de satisfacer la Ecuación 6.10.9.3.2-1.

De acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.9.2, en las almas no rigidizadas el corte ya está limitado a la resistencia a la fluencia por corte o bien a la resistencia al pandeo por corte en el Estado Límite de Resistencia. De acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.9.3.3, el corte en los paneles extremos de las almas rigidizadas también está limitado a la resistencia a la fluencia por corte o bien a la resistencia al pandeo por corte en el Estado Límite de Resistencia. Por consiguiente, no es necesario verificar el requisito indicado en este artículo para las almas no rigidizadas ni para los paneles extremos de las almas rigidizadas.

6.10.3.4 Colocación del tablero

Las secciones en flexión positiva que son compuestas en su condición final pero que son no compuestas durante la etapa constructiva se deberán investigar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.3.2 durante las diferentes etapas de colocación del tablero.

Las propiedades geométricas, longitudes de arriostramiento y tensiones usadas al calcular la resistencia nominal a la flexión deberán ser las correspondientes a la sección de acero exclusivamente. Se deberán considerar los cambios en las cargas, rigidez y arriostramiento durante las diferentes etapas de colocación del tablero.

Se deberán considerar los efectos de las fuerzas de las ménsulas del vuelo del tablero que actúan sobre las vigas exteriores.

C6.10.3.4

No se puede colocar la totalidad del tablero de hormigón en una sola etapa. Por lo tanto, es posible que partes de las vigas se vuelvan compuestas en etapas sucesivas. Si el tablero se coloca siguiendo determinadas secuencias de colocación, los momentos temporarios inducidos en las vigas durante la colocación del tablero pueden ser considerablemente mayores que los momentos debidos a las cargas permanentes finales en estado no compuesto una vez completada la secuencia de colocación.

Las vigas compuestas más económicas generalmente tienen el ala superior menor que el ala inferior. Por lo tanto, típicamente durante la colocación del tablero más de la mitad de la profundidad del alma está comprimida en las regiones de flexión positiva. Si en el diseño no se consideran los máximos momentos generados durante la secuencia de colocación del tablero, y si además las alas superiores de compresión son de poco ancho, estas condiciones pueden provocar problemas durante la construcción, como por ejemplo distorsiones fuera del plano de las alas de compresión y el alma de las vigas. En estos casos, al satisfacer la siguiente guía:

$$b_{fc} \geq \frac{L}{85} \quad (\text{C6.10.3.4-1})$$

donde:

L = longitud de cada tramo de viga para su envío (mm)

se pueden minimizar los problemas. Por lo tanto, se debería usar la Ecuación 1 junto con las limitaciones referentes a las proporciones especificadas en el Artículo 6.10.2.2 para establecer el mínimo ancho de ala superior requerido en las regiones de flexión positiva de las vigas compuestas. Se debe enfatizar que la Ecuación C1 se incluye exclusivamente a título de guía y no constituye un requisito absoluto.

Asegurar que las alas de todas las piezas que se anticipa será necesario izar en general satisfacen la guía anterior en la mayor parte de la longitud de cada pieza también puede contribuir a lograr piezas más estables y que sean más fáciles de manipular durante el montaje sin necesidad de utilizar estructuras ni encofrados especiales.

La colocación secuencial del tablero de hormigón también puede provocar deformaciones significativas por tracción en el tablero colocado anteriormente en los tramos adyacentes. Cuando se anticipa que habrá fisuración, para controlarla se requiere armadura longitudinal en el tablero como se especifica en el Artículo 6.10.3.2.4. Las flechas debidas a las cargas permanentes temporarias durante la

colocación secuencial del tablero también pueden ser diferentes a las flechas debidas a las cargas permanentes finales en la sección no compuesta. Si se considera que las diferencias son significativas, esto se debería considerar al establecer los requisitos sobre contraflecha y nivelación. Estos aspectos relacionados con la construibilidad se aplican tanto a la colocación del tablero como a su construcción inicial.

Durante la construcción de los puentes de vigas de acero, típicamente las cargas correspondientes al vuelo del tablero de hormigón son soportadas mediante ménsulas en voladizo que generalmente se colocan con una separación de entre 900 y 1200 mm a lo largo de los elementos exteriores. La excentricidad del peso del tablero y otras cargas que actúan sobre estas ménsulas genera momentos torsores aplicados en los elementos exteriores. Como resultado de ello, al diseñar los elementos exteriores se han de tener en cuenta la siguientes consideraciones:

- Los momentos torsores aplicados flexionan las alas superiores de la viga exterior hacia afuera. Las tensiones de flexión lateral resultantes en las alas tienden a ser mayores en los puntos de arriostramiento en uno o ambos extremos de la longitud no arriostrada. La tensión de flexión lateral en el ala superior es de tracción en los puntos de arriostramiento del lado del ala opuesta a las ménsulas. Estas tensiones de flexión lateral se deberían considerar al diseñar las alas.
- Las componentes horizontales de las reacciones sobre las ménsulas en voladizo muchas veces son transmitidas directamente al alma de la viga exterior. Debido a estas cargas es posible que el alma de la viga presente importantes deformaciones por flexión. Se debería considerar el efecto de estas deformaciones sobre las deformaciones verticales en el borde exterior del tablero. También se debería considerar el efecto de las reacciones de las ménsulas sobre las fuerzas en el marco transversal.
- Una excesiva deformación del alma o del ala superior puede producir una deflexión excesiva de las ménsulas y genera problemas para la aplicación del acabado del tablero.

Siempre que resulte práctico, las ménsulas se deberían prolongar hasta la intersección del ala inferior y el alma. Alternativamente, las ménsulas pueden apoyar sobre las almas de las vigas si se proporcionan medios para asegurar que el alma no resulte dañada y que las deformaciones asociadas permitan la correcta colocación del tablero de hormigón. Los requisitos del Artículo 6.10.3.2 permiten tomar en cuenta las tensiones de flexión lateral de las alas al diseñar las alas. En ausencia de un análisis más refinado,

dependiendo de cómo se supone que la carga excéntrica es aplicada al ala superior, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones para estimar los máximos momentos de flexión lateral de las alas debidos a las cargas excéntricas:

$$M_{\ell} = \frac{F_{\ell} L_b^2}{12} \quad (\text{C6.10.3.4-2})$$

donde:

M_{ℓ} = momento de flexión lateral en las alas debido a las cargas excéntricas de las ménsulas (N-mm)

F_{ℓ} = fuerza lateral uniformemente distribuida estáticamente equivalente debida a las cargas mayoradas de las ménsulas (N/mm)

L_b = longitud no arriostrada (mm)

$$M_{\ell} = \frac{P_{\ell} L_b}{8} \quad (\text{C6.10.3.4-3})$$

donde:

P_{ℓ} = fuerza lateral concentrada estáticamente equivalente de la ménsula colocada en la mitad de la longitud no arriostrada (N)

Las Ecuaciones C2 y C3 se basan en la hipótesis de longitudes interiores no arriostradas en las cuales el ala es continua en longitudes no arriostradas adyacentes, o bien en la hipótesis de longitudes no arriostradas adyacentes iguales tales que, debido a la existencia de condiciones de borde aproximadamente simétricas, los extremos de la longitud no arriostrada están efectivamente impedidos de rotar. Si estas hipótesis no se aproximan a las condiciones reales, el Ingeniero debería considerar otras idealizaciones más apropiadas.

La magnitud y aplicación de las cargas del sobrevuelo supuestas en el diseño deberían constar en la documentación técnica.

6.10.3.5 Deflexiones por cargas permanentes

Se deberá especificar una contraflecha para tomar en cuenta la deflexión por carga vertical calculada. La deflexión debida al peso del acero, del hormigón, de futuras superficies de rodamiento u otras cargas que no se aplican en el momento de la construcción se deberá informar por separado.

C6.10.3.5

Si se especifica una construcción por etapas, para determinar la contraflecha y las tensiones se deberá considerar la secuencia de aplicación de las cargas.

6.10.4 Estado Límite de Servicio

6.10.4.1 Deformaciones elásticas

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 2.5.2.6, según corresponda.

6.10.4.2 Deformaciones permanentes*6.10.4.2.1 Disposiciones generales*

Para los propósitos del presente artículo se deberá aplicar la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II especificada en la Tabla 3.4.1-1.

Para los elementos provistos de conectores de corte en la totalidad de su longitud que también satisfacen los requisitos del Artículo 6.10.1.7, las tensiones de flexión provocadas por las cargas correspondientes al Estado Límite de Servicio II aplicadas a la sección compuesta se pueden calcular usando la sección compuesta a corto o largo plazo, según corresponda, suponiendo que el tablero de hormigón es efectivo tanto para flexión positiva como para flexión negativa.

6.10.4.2.2 Flexión

Las alas deberán satisfacer los siguientes requisitos:

- Para el ala de acero superior de las secciones compuestas:

$$f_f \leq 0.95R_h F_{yf} \quad (6.10.4.2.2-1)$$

- Para el ala de acero inferior de las secciones compuestas:

$$f_f + \frac{f_\ell}{2} \leq 0.95R_h F_{yf} \quad (6.10.4.2.2-2)$$

- Para ambas alas de acero de las secciones no compuestas:

$$f_f + \frac{f_\ell}{2} \leq 0.80R_h F_{yf} \quad (6.10.4.2.2-3)$$

C6.10.4.1

Los requisitos del Artículo 2.5.2.6 contienen criterios opcionales para las deflexiones debidas a la sobrecarga y criterios para las relaciones longitud de tramo-profundidad. En ausencia de restricciones que limiten la profundidad, para establecer una profundidad mínima del alma para el diseño se debería usar la relación longitud de tramo-profundidad.

C6.10.4.2.1

La intención de estos requisitos es que se apliquen a la sobrecarga de diseño especificada en el Artículo 3.6.1.1. Si este criterio se fuera aplicar a una carga que requiera un permiso especial se debería considerar una reducción del factor de carga para la sobrecarga.

El Artículo 6.10.1.7 requiere que se coloque un uno por ciento de armadura longitudinal en el tablero cuando la tensión de tracción en el tablero de hormigón debida ya sea a las cargas constructivas mayoradas o a las cargas correspondientes al Estado Límite de Servicio II sea mayor que el módulo de rotura mayorado del hormigón. Controlando el tamaño de las fisuras en las regiones donde también hay una conexión de corte adecuada, el tablero de hormigón se puede considerar efectivo en tracción al calcular las tensiones de flexión en la sección compuesta debidas a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II.

C6.10.4.2.2

La intención de las Ecuaciones 1 a 3 es evitar que las cargas de tráfico esperadas provoquen deflexiones permanentes objetables que pudieran afectar la transitabilidad. Para el caso de las secciones homogéneas sin flexión lateral en las alas, estas ecuaciones corresponden a la verificación bajo sobrecarga de las Especificaciones Estándares AASHTO 2002 y se basan en prácticas que resultaron exitosas en el pasado. Su desarrollo se describe en el trabajo de Vincent (1969). En estas ecuaciones no se aplica un factor de resistencia debido a que los límites especificados corresponden a criterios de serviciabilidad para los cuales el factor de resistencia es igual a 1.0.

Al incluir el factor de hibridez, R_h , las Ecuaciones 1 a 3 consideran el aumento de las tensiones en las alas provocado por la fluencia temprana del alma de las secciones híbridas. De manera conservadora, se recomienda que el valor de R_h utilizado en estas ecuaciones sea el que se aplica a las verificaciones en Estado Límite de

donde:

f_f = tensión en el ala en la sección considerada debida a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa)

f_ℓ = tensión de flexión lateral del ala en la sección considerada debida a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

Para los elementos flexionales continuos que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2, se puede redistribuir un porcentaje calculado del momento negativo debido a las cargas correspondientes al Estado Límite de Servicio II en la sección considerada usando los procedimientos ya sea del Artículo B6.3 o del Artículo B6.6.

Para las secciones compuestas compactas en flexión positiva que se utilizan en las construcciones con apuntalamiento, la tensión de compresión longitudinal en el tablero de hormigón debida a las cargas correspondientes al Estado Límite de Servicio II, determinada de acuerdo con lo especificado en el Artículo 6.10.1.1.1d. no deberá ser mayor que $0.6f'_c$.

Excepto para las secciones compuestas en flexión positiva en las cuales el alma satisface el requisito del Artículo 6.10.2.1.1, todas las secciones también deberán satisfacer el siguiente requisito:

$$f_c \leq F_{crw} \quad (6.10.4.2.2-4)$$

donde:

f_c = tensión en el ala de compresión en la sección considerada debida a la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II calculada sin considerar la flexión lateral del ala (MPa)

F_{crw} = resistencia nominal al pandeo flexional para almas con o sin rigidizadores longitudinales, según corresponda, determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.9 (MPa)

Resistencia en la sección considerada.

Bajo las combinaciones de cargas especificadas en la Tabla 3.4.1-1, las Ecuaciones 1 a 3, según corresponda, no son determinantes y por lo tanto no es necesario verificarlas para las siguientes secciones:

- Secciones compuestas en flexión negativa para las cuales la resistencia nominal a la flexión bajo las combinaciones de cargas para Estado Límite de Resistencia se determina de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.8;
- Secciones no compuestas con $f_\ell = 0$ y para las cuales la resistencia nominal a la flexión bajo las combinaciones de cargas para Estado Límite de Resistencia se determina de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.8;
- Secciones no compuestas en flexión positiva.

Sin embargo, cuando corresponda, para estas secciones igualmente se deberá verificar la Ecuación 4.

El factor $1/2$ que aparece en las Ecuaciones 2 y 3 viene de los trabajos de Schilling (1996) y de Yoo y Davidson (1997). Las Ecuaciones 2 y 3 con una limitación a F_{yf} del lado derecho son una buena aproximación a las ecuaciones de interacción para fluencia para el nivel de carga correspondiente al inicio de la fluencia en la unión entre el alma y las alas, incluyendo el efecto de fluencia de la punta de las alas que ocurre antes de esta etapa, pero excluyendo los efectos de las tensiones residuales en las alas. Si las alas son nominalmente elásticas en la unión entre el alma y las alas y las tensiones de flexión lateral de las alas calculadas elásticamente se limitan como lo requiere la Ecuación 6.10.1.6-1, las deflexiones permanentes serán pequeñas. Los factores $0.95R_h$ y $0.80R_h$ se incluyen del lado derecho de las Ecuaciones 2 y 3 para que estas ecuaciones sean compatibles con las correspondientes ecuaciones de las Especificaciones anteriores cuando $f_\ell = 0$ y para proveer un grado de conservadurismo adicional para controlar las deformaciones permanentes cuando la flexión lateral de las alas sea significativa. En las Ecuaciones 2 y 3 el signo de f_f y f_ℓ siempre se debe tomar positivo.

f_f no se incluye en la Ecuación 1 porque el ala superior tiene apoyo lateral continuo proporcionado por el tablero de hormigón. Para las alas superiores con apoyo lateral continuo de las secciones no compuestas, el término f_ℓ de la Ecuación 3 se puede tomar igual a cero.

La fluencia localizada en las secciones en flexión negativa sobre las pilas interiores provoca la redistribución de los momentos elásticos. Para los elementos flexionales continuos que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2, para calcular los momentos de redistribución en el Estado Límite de Servicio se pueden usar ya sea los procedimientos del Artículo B6.3 o los del Artículo B6.6.

Estos procedimientos representan una mejora con respecto a la anterior regla que estipulaba la redistribución del diez por ciento. Cuando los momentos de redistribución se calculan de acuerdo con estos procedimientos no es necesario verificar las Ecuaciones 1 a 3, según corresponda, dentro de las regiones que se extienden desde la sección de la pila considerada hasta la transición del ala o punto de contraflexión bajo carga permanente más próximo, cualquiera sea el que esté más cerca, en cada tramo adyacente. Aun así, dentro de estas regiones será necesario considerar la Ecuación 4 usando los momentos elásticos anteriores a la redistribución. En todas las ubicaciones fuera de estas regiones, luego de la redistribución se deberán satisfacer las Ecuaciones 1 a 4, según corresponda.

Para las secciones compuestas compactas que se utilizan en las construcciones apuntaladas, las tensiones longitudinales en el tablero de hormigón se limitan a $0.6f'_c$ para asegurar el comportamiento lineal del hormigón. En las construcciones no apuntaladas, la tensión del hormigón cerca de la primera fluencia de cualquiera de las alas de acero generalmente es significativamente menor que f'_c por lo cual en este caso no es necesario verificar la tensión del hormigón.

Excepto para las secciones compuestas en flexión positiva en las cuales el alma satisface los requisitos del Artículo 6.10.2.1.1 de manera que no se requieren rigidizadores longitudinales, se deberá verificar el pandeo flexional del alma de todas las secciones bajo la combinación de cargas para Estado Límite de Servicio II de acuerdo con la Ecuación 4. El Artículo C6.10.1.9.1 explica por qué no es necesario verificar el pandeo flexional del alma en el caso de la excepción mencionada. En caso que se exceda la resistencia al pandeo flexional del alma, las opciones a considerar son similares a las discutidas al final del Artículo C6.10.3.2.1 al hablar de la etapa constructiva, excepto por supuesto la modificación de la secuencia de colocación del tablero.

Si se supone que en las regiones de flexión negativa el tablero de hormigón es efectivo en tracción, tal como se permite en el Estado Límite de Servicio para las secciones compuestas que satisfacen los requisitos especificados en el Artículo 6.10.4.2.1, más de la mitad del alma podría estar comprimida, aumentando así la susceptibilidad al pandeo flexional del alma. Como se especifica en el Artículo D6.3.1, para las secciones compuestas en flexión negativa el valor de D_c apropiado a utilizar en el Estado Límite de Servicio depende de si se supone que el tablero de hormigón es o no efectivo en tracción. Para las secciones no compuestas siempre se debería usar el valor de D_c correspondiente a la sección de acero solamente.

6.10.5 Estado límite de fatiga y fractura

6.10.5.1 Fatiga

Se deberán investigar los detalles a fatiga como se especifica en el Artículo 6.6.1. Se deberán aplicar la combinación de cargas para fatiga especificada en la Tabla 3.4.1-1 y la sobrecarga de fatiga especificada en el Artículo 3.6.1.4.

Se deberán aplicar los requisitos para fatiga en conectores de corte especificados en los Artículos 6.10.10.2 y 6.10.10.3.

6.10.5.2 Fractura

Los requisitos sobre tenacidad a la fractura especificados en la documentación técnica deberán cumplir con los requisitos del Artículo 6.6.2.

6.10.5.3 Requisito especial sobre fatiga aplicable a las almas

Para los propósitos del presente artículo, la carga de fatiga mayorada se deberá tomar igual a dos veces el valor calculado usando la combinación de cargas para Estado Límite de Fatiga especificada en la Tabla 3.4.1-1, tomando la sobrecarga de fatiga como se especifica en el Artículo 3.6.1.4.

Los paneles interiores de las almas con rigidizadores transversales, con o sin rigidizadores longitudinales, deberán satisfacer el siguiente requisito:

$$V_u \leq V_{cr} \quad (6.10.5.3-1)$$

donde:

V_u = corte en el alma en la sección considerada debido a la carga permanente no mayorada más la sobrecarga de fatiga (N)

V_{cr} = resistencia al pandeo por corte determinada mediante la Ecuación 6.10.9.3.3-1 (N)

C6.10.5.3

Si se satisface la Ecuación 1, se anticipa que el alma no sufrirá flexión elástica significativa y se asume que el elemento será capaz de soportar un número infinito de cargas pequeñas sin que este efecto provoque fisuración por fatiga.

Este requisito se incluye aquí y no en el Artículo 6.6 debido a que involucra una verificación de la máxima tensión de pandeo por corte del alma y no una verificación de los rangos de tensiones que provocan las cargas cíclicas.

Para esta verificación, la tensión que provoca la sobrecarga debida al paso de la sobrecarga de fatiga especificada es la del camión más pesado que se anticipa atravesará el puente en un período de 75 años.

Estas Especificaciones no incluyen la verificación del pandeo flexional de las almas debido a la combinación de cargas especificada en este artículo como se indica en AASHTO (1998). Excepto para las secciones compuestas en flexión positiva en las cuales el alma satisface el Artículo 6.10.2.1.1, para todas las secciones es necesario verificar el pandeo flexional bajo la combinación de cargas correspondiente a Estado de Servicio II según los requisitos del Artículo 6.10.4.3.2.2. Tal como se discutió en el Artículo 6.10.1.9.1, si la sección satisface los requisitos del Artículo 6.10.2.1.1, el pandeo flexional del alma de las secciones compuestas en flexión positiva no constituye un riesgo en ninguno de los estados límites después que la sección alcanza su condición compuesta final. Para todas las demás secciones, la verificación del pandeo flexional del alma bajo las cargas para Estado Límite de Servicio II será determinante con respecto a una verificación similar bajo la combinación de cargas especificada en esta sección. Para las secciones compuestas en flexión positiva con almas que no satisfacen el Artículo 6.10.2.1.1, el menor valor de F_{crw} que resulta del mayor valor de D_c en el Estado Límite de Fatiga tiende a ser compensado por la menor tensión de

compresión en el alma debida a la combinación de cargas especificada en este artículo. El pandeo flexional del alma de estas secciones también se debe verificar bajo las condiciones existentes durante la construcción de acuerdo con la Ecuación 6.10.3.2.1-3.

De acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.9.2, en las almas no rigidizadas el corte ya está limitado a resistencia a la fluencia por corte o bien a la resistencia al pandeo por corte en el Estado Límite de Resistencia. De acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.9.3.3, el corte en los paneles extremos de las almas rigidizadas también está limitado a la resistencia a la fluencia por corte o a la resistencia al pandeo por corte. Por consiguiente, no es necesario verificar el requisito indicado en este artículo para las almas no rigidizadas ni para los paneles extremos de las almas rigidizadas.

6.10.6 Estado Límite de Resistencia

6.10.6.1 Disposiciones generales

Para los propósitos del presente artículo, se deberán aplicar las combinaciones de cargas para Estado Límite de Resistencia especificadas en la Tabla 3.4.1-1.

6.10.6.2 Flexión

6.10.6.2.1 Disposiciones generales

Si en la sección considerada hay orificios en el ala de tracción, el ala de tracción también deberá satisfacer el requisito especificado en el Artículo 6.10.1.8.

C6.10.6.1

En el Estado Límite de Resistencia, el Artículo 6.10.6 refiere al Ingeniero a los artículos aplicables para el diseño de secciones doble Te compuestas o no compuestas en regiones de flexión positiva o negativa.

C6.10.6.2.1

Para las secciones en las cuales la resistencia a la flexión se expresa en términos de la tensión, el valor de la tensión en el ala calculada elásticamente no es estrictamente igual a la tensión real en el ala porque, debido a la combinación de las sollicitaciones provocadas por las cargas aplicadas, las tensiones residuales iniciales y otras tensiones incidentales no incluidas en los cálculos de diseño, dentro de la sección transversal hay una limitada fluencia parcial. Los efectos de la fluencia parcial de la sección transversal antes de que se alcance la resistencia máxima como se define en estas especificaciones son muy pequeños y por lo tanto pueden ser despreciados.

El uso de tensiones se considera más apropiado en elementos dentro de los cuales la máxima resistencia es siempre menor o igual que el momento de fluencia M_y en flexión respecto del eje mayor. Esto se debe a la naturaleza de los diferentes tipos de cargas que contribuyen a las tensiones de compresión en el elemento: en estado no compuesto, compuesto a largo plazo, y compuesto a corto plazo. Los efectos combinados de las cargas en estos diferentes estados de la sección transversal se manejan mejor si se trabaja con las tensiones en las alas antes que con los momentos. Además, si el Ingeniero utiliza para el

análisis un software en el cual las alas de los elementos de sección doble T_e y/o el tablero compuesto se representan en forma de elementos tipo placa, las tensiones en las alas se obtienen directamente del software, mientras que el momento flector total soportado por un elemento dado requiere procesamiento adicional. Finalmente, por lo general los ingenieros especializados en puentes están más acostumbrados a trabajar con tensiones que con momentos. Por lo tanto, aunque se pueden escribir requisitos equivalentes en términos del momento flector, siempre que la máxima resistencia potencial en términos de f_{bu} sea menor o igual que F_y , los requisitos del Artículo 6.10 se expresan en términos de la tensión.

A la inversa, para los elementos en los cuales la resistencia es potencialmente mayor que M_y , la significativa fluencia en la sección transversal hace que sea incómodo manejar las capacidades en términos de las tensiones. Aunque los requisitos que están expresados en términos del momento se pueden expresar de manera equivalente en términos de la tensión elástica, los correspondientes límites a la tensión elástica generalmente serán mayores que la tensión de fluencia debido a que los momentos son mayores que el momento de fluencia. Además, el cálculo de la resistencia cuando la resistencia es en general mayor que M_y se basa fundamentalmente en resultantes de tensiones. Por ejemplo, la resistencia de M_p para una sección compuesta compacta en flexión positiva se basa en un análisis plástico de la sección transversal compuesta. Por lo tanto, para este tipo de secciones resulta más natural expresar las ecuaciones de resistencia en términos de los momentos flectores. Este también es el enfoque adoptado por AASHTO (1998).

Para las secciones en las cuales la resistencia a la flexión se expresa en términos del momento, los momentos que actúan en la sección no compuesta, compuesta a largo plazo y compuesta a corto plazo se pueden sumar directamente para su comparación contra la resistencia nominal a la flexión. En otras palabras, no se considera el efecto de la secuencia de aplicación de los diferentes tipos de cargas sobre los estados tensionales ni los efectos de la fluencia parcial de la sección transversal sobre la máxima resistencia de la sección transversal.

La intención del requisito del Artículo 6.10.1.8 es evitar la fractura de la sección neta de las secciones transversales que tienen orificios en el ala de tracción, ya sea que estas secciones estén sujetas a flexión positiva o negativa.

En artículos subsiguientes se asume que un ala comprimida que tiene apoyo lateral continuo no está sujeta a pandeo local ni lateral torsional. La lógica que justifica la exclusión de estas verificaciones en estado límite se discute en el Artículo C6.10.3.2.3.

Estos requisitos asumen que en el elemento los niveles de fuerza axial son bajos o nulos. En el caso de las

secciones que en el Estado Límite de Resistencia también están sujetas a una fuerza axial sin excentricidad, P_u , debida a las cargas mayoradas superior al diez por ciento de la resistencia axial mayorada del elemento, P_r , la sección se debería verificar de acuerdo con los requisitos de los Artículos 6.8.2.3 o 6.9.2.2, según corresponda. De acuerdo con las ecuaciones dadas en estos artículos, cuando P_u es igual a diez por ciento de P_r , la resistencia a la flexión del elemento se reduce en cinco por ciento. Por debajo de este nivel, al diseñar el elemento es razonable ignorar el efecto de la fuerza axial.

6.10.6.2.2 Secciones compuestas en flexión positiva

Las secciones compuestas que satisfacen los siguientes requisitos deberán ser clasificadas como secciones compuestas compactas:

- las resistencias mínimas a la fluencia especificadas de las alas no son mayores que 485 MPa,
- el alma satisface el requisito del Artículo 6.10.2.1.1,

y

- la sección satisface el límite de esbeltez para el alma:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.10.6.2.2-1)$$

donde:

D_{cp} = profundidad del alma comprimida cuando se produce el momento plástico determinada como se especifica en el Artículo D6.3.2 (mm)

Las secciones compactas deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.7.1. Caso contrario, la sección se deberá considerar no compacta y deberá satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.7.2.

Tanto las secciones compactas como las secciones no compactas deberán satisfacer los requisitos de ductilidad especificados en el Artículo 6.10.7.3.

C6.10.6.2.2

De acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.7, se permite que la resistencia nominal a la flexión de las secciones compuestas en flexión positiva que satisfacen los requisitos sobre grado del acero, esbeltez del alma y ductilidad sea mayor que el momento en primera fluencia. Por lo tanto, es más apropiado expresar la resistencia nominal a la flexión de estas secciones, conocidas como secciones compactas, en términos del momento. Para las secciones compuestas en flexión positiva que no satisfacen uno o más de estos requisitos, conocidas como secciones no compactas, no se permite que la resistencia nominal a la flexión sea mayor que el momento en primera fluencia y, por lo tanto, es más apropiado expresarla en términos de la tensión en el ala calculada elásticamente.

Las secciones compuestas en flexión positiva cuyas alas tienen una resistencia a la fluencia mayor que 485 MPa o cuyas almas no satisfacen el Artículo 6.10.2.1.1 se deben diseñar en el Estado Límite de Resistencia como secciones no compactas, tal como se especifica en el Artículo 6.10.7.2. Para las resistencias a la compresión que habitualmente se utilizan en la construcción de tableros, el uso de resistencias a la fluencia más elevadas podría resultar en la no linealidad y potencial aplastamiento del hormigón del tablero antes que éste alcance la resistencia a la flexión especificada en el Artículo 6.10.7.1 para secciones compactas. Generalmente en las secciones cuyas almas no satisfacen el Artículo 6.10.2.1.1 es necesario colocar rigidizadores longitudinales. Debido a que las secciones rigidizadas longitudinalmente tienden a ser más profundas y se utilizan en tramos más largos con tensiones por carga permanente más elevadas en estado no compuesto, estas secciones tienden a tener valores de D_c/t_w que imposibilitarían el desarrollo de deformaciones por flexión inelástica significativas dentro del alma antes del pandeo flexional para niveles de momento próximos a $R_h M_y$. Por lo tanto, aunque típicamente la profundidad del alma comprimida se reduce a medida que se producen las deformaciones plásticas asociadas con momentos mayores que $R_h M_y$, y que de hecho D_{cp} puede satisfacer la Ecuación

1 al llegar a la resistencia al momento plástico, no hay suficientes datos de ensayo disponibles para justificar el diseño de este tipo de secciones para M_p . Asimismo, debido al tamaño relativo de la sección de acero con respecto al tablero de hormigón en este tipo de secciones, muchas veces M_p no es sustancialmente mayor que $R_h M_y$. Debido a todos estos factores, las secciones compuestas en flexión positiva en las cuales el alma no satisface el Artículo 6.10.2.1.1 se clasifican como secciones no compactas.

El requisito de este artículo referente a la esbeltez fue adoptado de AISC (1999) y con él se obtiene aproximadamente la misma esbeltez admisible para el alma que la que AASHTO (2002) especifica para las secciones compactas. De acuerdo con este criterio, la mayoría de las secciones compuestas en flexión positiva sin rigidizadores de alma longitudinales serán clasificadas como compactas porque el tablero de hormigón provoca un corrimiento del eje neutro hacia arriba, el cual reduce la profundidad del alma comprimida. Además, para estas secciones D/t_w se limita a un valor máximo de 150 en base al requisito del Artículo 6.10.2.1.1. La ubicación del eje neutro de la sección compuesta al llegar al momento plástico se puede determinar usando las ecuaciones de la Tabla D6.1-1.

Las secciones compuestas compactas en flexión positiva también deben satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.7.3 para asegurar que el modo de falla sea dúctil. Las secciones no compactas también deben satisfacer el requisito de ductilidad especificado en el Artículo 6.10.7.3 para asegurar que el modo de falla sea dúctil. Satisfacer este requisito asegura un margen de seguridad adecuado contra el aplastamiento prematuro del tablero de hormigón en el caso de secciones en las cuales se utilizan aceros de 690 MPa y/o secciones utilizadas en construcciones apuntaladas. Este requisito también es un límite fundamental para determinar si está o no permitido desprestigiar el pandeo flexional del alma al diseñar secciones compuestas en flexión positiva cuando el alma también satisface el Artículo 6.10.2.1.1, tal como se discute en el Artículo C6.10.1.9.1.

6.10.6.2.3 Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compactas

Las secciones para las cuales:

- las resistencias mínimas a la fluencia especificadas de las alas no son mayores que 485 MPa,

y

- el alma satisface el límite de esbeltez correspondiente a sección no compacta:

C6.10.6.2.3

Para las secciones compuestas en flexión negativa y las secciones no compuestas, los requisitos del Artículo 6.10.8 limitan la resistencia nominal a la flexión de manera que sea menor o igual que el momento en primera fluencia. En consecuencia, la resistencia nominal a la flexión para estas secciones se expresa convenientemente en términos de la tensión en el ala calculada elásticamente.

Para las secciones compuestas en flexión negativa o las secciones no compuestas que satisfacen requisitos específicos en cuanto a la resistencia del acero y con almas

$$\frac{2D_c}{t_w} < 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.10.6.2.3-1)$$

donde:

D_c = profundidad del alma comprimida en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

se podrán dimensionar de acuerdo con los requisitos para secciones de alma compacta o no compacta especificados en el Apéndice A. Caso contrario, la sección se deberá dimensionar de acuerdo con los requisitos especificados en el Artículo 6.10.8.

Para los elementos flexionales continuos que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2, se puede redistribuir un porcentaje calculado del momento negativo debido a las cargas mayoradas en la sección considerada usando los procedimientos ya sea del Artículo B6.4 o del Artículo B6.6.

que satisfacen la Ecuación 1 se pueden aplicar los requisitos del Apéndice A para determinar la resistencia nominal a la flexión, la cual puede ser mayor que el momento en primera fluencia. Por lo tanto, la resistencia nominal a la flexión determinada a partir de los requisitos del Apéndice A se expresa en términos del momento. Debido a que estos tipos de secciones son de uso menos frecuente, los requisitos para su diseño se han ubicado en un apéndice a fin de simplificar el cuerpo principal de las Especificaciones. Para este tipo de secciones se pueden utilizar los requisitos del Artículo 6.10.8 para obtener una determinación de la resistencia nominal a la flexión más precisa o algo más conservadora con respecto a la que se obtendría usando el Apéndice A.

La Ecuación 1 define el límite de esbeltez para un alma no compacta. Un alma cuya relación de esbeltez sea mayor que este límite se denomina esbelta. Las Especificaciones anteriores clasificaban a las secciones como compactas o no compactas y no distinguían explícitamente entre un alma no compacta y un alma esbelta. Para las almas no compactas, el pandeo flexional teórico del alma no ocurre para valores elásticos de la tensión, calculados de acuerdo con la teoría de vigas, menores que el límite de la resistencia a la flexión. Bajo las combinaciones de cargas correspondientes al Estado Límite de Resistencia, las secciones con almas esbeltas confían en la considerable resistencia post-pandeo flexional de las almas. En la Tabla C6.10.1.10.2-2 se indican valores específicos del límite de esbeltez para almas no compactas correspondientes a diferentes grados de acero.

Un alma compacta es un alma que satisface el límite de esbeltez dado por la Ecuación A6.2.1-1. Las secciones con alma compacta pueden desarrollar plenamente su capacidad de momento plástico siempre y cuando se satisfagan otros requisitos sobre grado del acero, ductilidad, esbeltez de las alas y/o arriostramiento lateral. El límite de esbeltez del alma dado por la Ecuación A6.2.1-1 es significativamente menor que el límite indicado en la Tabla C6.10.1.10.2-2. Generalmente los perfiles doble Te laminados satisfacen este límite, aunque no así las secciones compuestas de proporciones más eficientes.

La tensión de fluencia del ala, F_{yc} , es más relevante que F_{yw} para el comportamiento de pandeo del alma y su influencia sobre la resistencia flexional. En el caso de las secciones cuyas almas están dimensionadas en el límite correspondiente a sección no compacta, un ala de compresión estable nominalmente elástica tiende a restringir el alma híbrida de menor resistencia a niveles de tensión menores o iguales que $R_h F_{yc}$. Para una sección que tiene un alma compacta, las deformaciones inelásticas asociadas con el desarrollo de la resistencia a la flexión plástica están más relacionadas con la resistencia a la fluencia del ala que con la del alma.

La mayoría de las secciones doble Te de los puentes de acero utilizan ya sea almas esbeltas o almas compactas que se acercan al límite de esbeltez de la Ecuación 1, representado por los valores listados en la Tabla C6.10.1.10.2-2. Para estas secciones, los requisitos más simples del Artículo 6.10.8 son los más apropiados para determinar la resistencia nominal a la flexión de las secciones compuestas en flexión negativa y de las secciones no compuestas. Estos requisitos también se pueden aplicar a secciones con almas no compactas o que son casi compactas, pero a expensas de algo de economía. Este tipo de secciones generalmente se utilizan en puentes de tramos más cortos. La potencial pérdida de economía aumenta a medida que disminuye la esbeltez del alma. El Ingeniero debería considerar cuidadosamente el uso de los requisitos del Apéndice A para calcular la resistencia nominal a la flexión de estas secciones, en particular, la de las secciones con almas compactas.

La fluencia en las secciones en flexión negativa en las pilas interiores en el Estado Límite de Resistencia provoca una redistribución de los momentos elásticos. Para los elementos flexionales continuos que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2, para calcular los momentos de redistribución en el Estado Límite de Resistencia se pueden utilizar los procedimientos ya sea del Artículo B6.4 o del Artículo B6.6. Estos requisitos reemplazan la anterior regla que estipulaba la redistribución del diez por ciento del momento y proporcionan un enfoque más racional para calcular el porcentaje a redistribuir para las secciones sobre las pilas interiores. Cuando los momentos de redistribución se calculan de acuerdo con estos procedimientos, no es necesario verificar las resistencias a la flexión en el Estado Límite de Resistencia dentro de las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2. En todas las demás ubicaciones, luego de la redistribución se deben satisfacer los requisitos de los Artículos 6.10.7, 6.10.8.1 o A6.1, según corresponda. Muchas veces las secciones sobre las pilas y de alas compactas, no rigidizadas o rigidizadas transversalmente, que por lo demás son diseñadas de acuerdo con el Artículo 6.10.8 o el Apéndice A usando $C_b = 1.0$, satisfacen los requisitos del Artículo B6.2.

6.10.6.3 Corte

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.9.

6.10.6.4 Conectores de corte

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.10.4.

6.10.7 Resistencia a la flexión – Secciones compuestas en flexión positiva

6.10.7.1 Secciones compactas

6.10.7.1.1 Disposiciones generales

En el Estado Límite de Resistencia la sección deberá satisfacer:

$$M_u + \frac{1}{3} f_\ell S_{xt} \leq \phi_f M_n \quad (6.10.7.1.1-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_ℓ = tensión de flexión lateral del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

M_n = resistencia nominal a la flexión de la sección determinada como se especifica en el Artículo 6.10.7.1.2 (N-mm)

M_u = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (N-mm)

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

S_{xt} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} (mm³)

6.10.7.1.2 Resistencia nominal a la flexión

La resistencia nominal a la flexión de la sección se deberá tomar como:

Si $D_p \leq 0.1D_t$, entonces:

C6.10.7.1.1

Para las secciones compuestas en flexión positiva no es necesario considerar la flexión lateral en el ala de compresión en el Estado Límite de Resistencia, ya que el tablero de hormigón le proporciona apoyo lateral continuo a esta ala.

La Ecuación 1 es una ecuación de interacción que se considera la influencia de la flexión lateral dentro del ala de tracción, representada por la tensión de flexión lateral del ala calculada elásticamente, f_ℓ , combinada con el momento flector respecto del eje mayor, M_u . Esta ecuación es similar a las ecuaciones 6.10.7.2.1-2 y 6.10.8.1.2-1, cuyo fundamento se explica en el Artículo C6.10.8.1.2. Sin embargo, estas otras ecuaciones se expresan en formato de tensiones calculadas elásticamente, y el término de resistencia a su derecha es generalmente igual a $\phi_f R_h F_{yt}$. La Ecuación 1 se expresa en formato de momentos flectores, pero alternativamente se puede considerar en formato de tensiones dividiendo ambos lados de la ecuación por el módulo resistente elástico de la sección, S_{xt} .

El término M_n del lado derecho de la Ecuación 1 es generalmente mayor que la capacidad de momento de fluencia, M_{yt} . Por lo tanto, la correspondiente resistencia, escrita en el formato de una tensión calculada elásticamente, es generalmente mayor que F_{yt} . Estas Especificaciones usan un formato de momentos para todas las ecuaciones de resistencia que, si se escriben en términos de una tensión calculada elásticamente, potencialmente pueden asumir valores de resistencia mayores que la resistencia mínima a la fluencia especificada del acero. En estos tipos de secciones el momento flector respecto del eje mayor es físicamente una magnitud más significativa que la correspondiente tensión de flexión calculada elásticamente.

La Ecuación 1 proporciona una representación razonablemente precisa pero conservadora de los resultados de un análisis elasto-plástico de la sección en el cual, para tomar en cuenta la flexión lateral de las alas, a partir de las puntas del ala de tracción se resta una fracción del ancho. El fundamento en que se basa el cálculo de S_{xt} tal como se define en este artículo para utilizar en la Ecuación 1 se discute en el Artículo CA6.1.1.

C6.10.7.1.2

La Ecuación 2 implementa la filosofía introducida por Wittry (1993) en el sentido de que se le debería aplicar un margen de seguridad adicional a la resistencia nominal a la flexión teórica de las secciones compuestas compactas en flexión positiva cuando la profundidad del eje neutro

$$M_n = M_p \quad (6.10.7.1.2-1)$$

Caso contrario:

$$M_n = M_p \left(1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t} \right) \quad (6.10.7.1.2-2)$$

donde:

D_p = distancia entre la cara superior del tablero de hormigón y el eje neutro de la sección compuesta cuando se produce el momento plástico (mm)

D_t = profundidad total de la sección compuesta (mm)

M_p = momento plástico de la sección compuesta determinado como se especifica en el Artículo D6.1 (N-mm)

En un tramo continuo la resistencia nominal a la flexión de la sección no deberá ser mayor que:

$$M_n = 1.3R_h M_y \quad (6.10.7.1.2-3)$$

donde:

M_y = momento de fluencia determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

a menos que:

- el tramo considerado y todas las secciones sobre pilas interiores adyacentes satisfagan los requisitos del Artículo B6.2,

y

- el correspondiente valor de θ_{RL} del Artículo B6.6.2 sea mayor que 0.009 radianes en todas las secciones sobre pilas interiores adyacentes,

en cuyo caso la resistencia nominal a la flexión de la sección no está sujeta a la limitación impuesta por la Ecuación 3.

plástico por debajo de la cara superior del tablero, D_p , sea mayor que un cierto valor. Este margen de seguridad adicional, que aumenta aproximadamente como una función lineal de D_p/D_t , pretende proteger al tablero de hormigón contra el aplastamiento prematuro, asegurando así la adecuada ductilidad de la sección compuesta. Las secciones con D_p/D_t menor o igual que 0.1 pueden alcanzar como mínimo el momento plástico, M_p , de la sección compuesta sin problemas de ductilidad.

La Ecuación 2 proporciona aproximadamente los mismos resultados que la ecuación comparable de las Especificaciones anteriores, pero es una forma más sencilla que depende solamente de la resistencia al momento plástico M_p y de la relación D_p/D_t , como también se sugiere en Yakel y Azizinamini (2004). Ambas ecuaciones implementan la filosofía anterior justificada por Wittry (1993). La Ecuación 2 es algo más restrictiva que la ecuación de las Especificaciones anteriores para las secciones con valores pequeños de M_p/M_y , tales como las secciones con almas híbridas, un área de tablero relativamente pequeña y un ala de tracción de alta resistencia. Es algo menos restrictiva para las secciones con valores de M_p/M_y más elevados. Wittry (1993) consideró diferentes resultados experimentales y realizó una gran cantidad de análisis de parámetros de las secciones transversales. La menor resistencia experimental o teórica de todas las secciones transversales consideradas en esta investigación y en otros estudios posteriores es de $0.96M_p$. La Ecuación 2 se basa en el margen de seguridad adicional objetivo de 1.28 especificado por Wittry para el valor máximo permitido de D_p combinado con una resistencia teórica supuesta igual a $0.96M_p$ en este límite. Para el valor máximo permitido de D_p especificado por la Ecuación 6.10.7.3-1, la resistencia nominal de diseño a la flexión resultante es $0.78M_p$.

El límite de $D_p < 0.1D_t$ para utilizar la Ecuación 1 se obtiene utilizando un único valor implícito de β igual a 0.75 en las ecuaciones comparables de AASHTO (1998). AASHTO (1998) especifica $\beta = 0.7$ para $F_y = 345$ y 485 MPa y $\beta = 0.9$ para $F_y = 250$ MPa. Considerando la dispersión de los datos sobre endurecimiento por deformación, para todos los casos se justifica el valor de $\beta = 0.75$. Los valores de β presentados son sensibles a las características de endurecimiento por deformación supuestas.

En ciertos casos el factor de forma, M_p/M_y , para las secciones compuestas en flexión positiva puede ser algo mayor que 1.5. Por lo tanto, en estas situaciones para llegar a M_p se requiere una fluencia considerable y la curvatura inelástica resultante. Esta fluencia reduce la rigidez efectiva de la sección en flexión positiva. En los tramos continuos la reducción de la rigidez puede trasladar momento desde las regiones en flexión positiva hacia las regiones en flexión

negativa. Si las secciones sobre las pilas interiores en estas regiones no tienen la capacidad adicional para soportar estos momentos más elevados y no están diseñadas de manera de tener una respuesta momento/rotación dúctil de acuerdo con los requisitos del Apéndice B, trasladar momento a estas secciones podría resultar en un colapso incremental bajo la aplicación repetitiva de la sobrecarga. En consecuencia, para casos en los cuales el tramo o cualquiera de las secciones sobre las pilas interiores adyacentes no satisfacen los requisitos del Artículo B6.2, o bien cuando el valor apropiado de θ_{RL} del Artículo B6.6.2 en cualquiera de las secciones sobre las pilas adyacentes es menor o igual que 0.009 radianes, las secciones en flexión positiva deben satisfacer la Ecuación 3.

Los requisitos anteriores se pueden satisfacer asegurando que cuando se redistribuyen momentos mayores que $R_h M_y$, y si además estos momentos se combinan con los momentos negativos concurrentes en las secciones sobre las pilas determinados mediante un análisis elástico, no se supere la resistencia a la flexión de esas secciones. AASHTO (1998) denomina a este enfoque el Método Refinado. Sin embargo, los momentos concurrentes generalmente no se consideran en el análisis y por lo tanto este método no se incluye en estas Especificaciones.

La intención de la Ecuación 3 es limitar la cantidad de momento adicional permitido por encima de $R_h M_y$ en las secciones compuestas en flexión positiva a 30 por ciento de $R_h M_y$ en los tramos continuos cuando el tramo o cualquiera de ambas secciones sobre las pilas adyacentes no satisfacen los requisitos del Artículo B6.2. El límite de $1.3 R_h M_y$ es igual que el límite especificado en AASHTO (1998) para el Método Aproximado. La resistencia nominal a la flexión determinada mediante la Ecuación 3 no debe ser mayor que la resistencia determinada mediante las Ecuaciones 1 o 2, según corresponda, para asegurar la adecuada resistencia y ductilidad de la sección compuesta. En casos en los cuales D_p/D_t es relativamente elevado y M_p/M_y es relativamente pequeño, es posible que la Ecuación 2 sea determinante con respecto a la Ecuación 3. Sin embargo, en la mayoría de los casos que se presentan en la práctica la ecuación determinante será la Ecuación 3.

Las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 y para las cuales el correspondiente valor de θ_{RL} del Artículo B6.6.2 es mayor que 0.009 radianes tienen suficiente ductilidad y una robustez tal que la redistribución de momentos provocada por la fluencia parcial dentro de las regiones de flexión positiva es insignificante. El valor de 0.009 radianes se toma como límite superior para el potencial aumento de las rotaciones inelásticas en las secciones sobre las pilas interiores debido a la fluencia por momento positivo. Por lo tanto, la resistencia nominal a la flexión de las secciones en flexión positiva en los tramos continuos que satisfacen

estos requisitos no se ve limitada por el efecto de un potencial corrimiento de los momentos. Con frecuencia las secciones con alas compactas no rigidizadas o rigidizadas transversalmente diseñadas de acuerdo con el Artículo 6.10.8 o el Apéndice A usando $C_b = 1.0$ satisfacen estas restricciones. Todos los perfiles doble T laminados disponibles en la actualidad conformes a la norma ASTM A6 y que satisfacen las Ecuaciones B6.2.1-3, B6.2.2-1 y B6.2.4-1 satisfacen estas restricciones. Todas las secciones armadas que satisfacen el Artículo B6.2 y para las cuales $D/b_{fc} < 3.14$ o que satisfacen los requisitos adicionales del Artículo B6.5.1 también satisfacen estas restricciones.

Para poder utilizar la resistencia adicional en flexión positiva, no se exige al Ingeniero redistribuir los momentos de las secciones en las pilas sino sólo satisfacer las restricciones indicadas del Apéndice B para asegurar una significativa ductilidad y robustez de las secciones sobre las pilas adyacentes. En estos casos, si se desea, está permitido redistribuir los momentos en las pilas de acuerdo con los requisitos del Apéndice B.

Bajo las combinaciones de cargas especificadas en la Tabla 3.4.1-1 y en ausencia de flexión lateral de las alas, el criterio sobre deflexiones permanentes en Estado Límite de Servicio dado por la Ecuación 6.10.4.2.2-2 muchas veces determinará el diseño del ala inferior de las secciones compuestas compactas en flexión positiva cuando la resistencia nominal a la flexión en el Estado Límite de Resistencia se base en las Ecuaciones 1, 2 o 3. Por tanto, es prudente y conveniente diseñar inicialmente este tipo de secciones de manera que satisfagan este criterio sobre deformaciones permanentes en Estado Límite de Servicio y luego verificar la resistencia nominal a la flexión en Estado Límite de Resistencia de acuerdo con las Ecuaciones 1, 2 o 3 según corresponda.

6.10.7.2 Secciones no compactas

6.10.7.2.1 Disposiciones generales

En el Estado Límite de Resistencia el ala de compresión deberá satisfacer:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc} \quad (6.10.7.2.1-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_{bu} = tensión en el ala calculada sin considerar la flexión lateral del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

C6.10.7.2.1

En el Estado Límite de Resistencia, para las secciones no compactas el ala de compresión debe satisfacer la Ecuación 1 y el ala de tracción debe satisfacer la Ecuación 2. El fundamento de la Ecuación 2 se explica en el Artículo C6.10.8.1.2. Debido a que el ala tiene apoyo lateral continuo proporcionado por el tablero de hormigón, para las secciones compuestas en flexión positiva no es necesario considerar la flexión lateral en el ala de compresión en Estado Límite de Resistencia.

Para las secciones no compactas utilizadas en construcciones apuntaladas, la tensión longitudinal en el tablero de hormigón se limita a $0.6f'_c$ para garantizar el comportamiento lineal del hormigón, hipótesis que se asume en el cálculo de las tensiones en las alas de acero. En

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión del ala de compresión determinada como se especifica en el Artículo 6.10.7.2.2 (MPa)

El ala de tracción deberá satisfacer:

$$f_{bu} + \frac{1}{3}f_{\ell} \leq \phi_f F_{nt} \quad (6.10.7.2.1-2)$$

donde:

f_{ℓ} = tensión de flexión lateral en el ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

F_{nt} = resistencia nominal a la flexión del ala de tracción determinada como se especifica en el Artículo 6.10.7.2.2 (MPa)

Para las construcciones apuntaladas la máxima tensión de compresión longitudinal en el tablero de hormigón en Estado Límite de Resistencia, determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.1.1d, no deberá ser mayor que $0.6f'_c$.

6.10.7.2.2 Resistencia nominal a la flexión

La resistencia nominal a la flexión del ala de compresión se deberá tomar como:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (6.10.7.2.2-1)$$

donde:

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

La resistencia nominal a la flexión del ala de tracción se deberá tomar como:

$$F_{nt} = R_h F_{yt} \quad (6.10.7.2.2-2)$$

6.10.7.3 Requisito de ductilidad

Las secciones compactas y no compactas deberán satisfacer:

$$D_p \leq 0.42D_t \quad (6.10.7.3-1)$$

donde:

las construcciones no apuntaladas, la tensión en el hormigón al aproximarse a la primera fluencia de cualquiera de las alas de acero es en general significativamente menor que f'_c y por lo tanto en este caso no es necesario verificar la tensión del hormigón.

C6.10.7.2.2

La resistencia nominal a la flexión de las secciones compuestas no compactas en flexión positiva se limita al momento en primera fluencia. Por este motivo la resistencia nominal a la flexión se expresa simplemente en función de la tensión en las alas. Para las secciones no compactas, la tensión en cada ala debida a las cargas mayoradas calculada elásticamente, determinada de acuerdo con el Artículo 6.10.1.1.1a se compara contra la tensión de fluencia de las alas multiplicada por los factores de reducción de la resistencia apropiados.

C6.10.7.3

El requisito de ductilidad especificado en este artículo pretende proteger al tablero de hormigón contra el aplastamiento prematuro y es equivalente al requisito dado por la Ecuación 5.7.3.3.1-1. El límite de $D_p < 5D'$ dado en AASHTO (1998) corresponde a $D_p/D_t < 0.5$ para $\beta = 0.75$. En la Ecuación 1 la relación D_p/D_t se reduce a 0.42 para

D_p = distancia entre la cara superior del tablero de hormigón y el eje neutro de la sección compuesta cuando se produce el momento plástico (mm)

D_t = profundidad total de la sección compuesta (mm)

asegurar una fluencia significativa del ala inferior cuando la cara superior del tablero alcance la deformación de aplastamiento para todos los casos potenciales. Al verificar este requisito D_t se debería calcular usando una estimación de límite inferior del espesor real del enriñonado de hormigón, o bien se puede determinar de forma conservadora despreciando el espesor del enriñonado.

6.10.8 Resistencia a la flexión – Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas

6.10.8.1 Disposiciones generales

6.10.8.1.1 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a compresión

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} + \frac{1}{3}f_\ell \leq \phi_f F_{nc} \quad (6.10.8.1.1-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_{bu} = tensión en el ala calculada sin considerar la flexión lateral del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

f_ℓ = tensión de flexión lateral en el ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión del ala de compresión determinada como se especifica en el Artículo 6.10.8.2 (MPa)

6.10.8.1.2 Alas con arriostramiento discreto solicitadas a tracción

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} + \frac{1}{3}f_\ell \leq \phi_f F_{nt} \quad (6.10.8.1.2-1)$$

donde:

F_{nt} = resistencia nominal a la flexión del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.8.3 (MPa)

C6.10.8.1.1

La Ecuación 1 considera la resistencia del ala de compresión tratando a este elemento como una viga-columna equivalente. De hecho, la ecuación es una ecuación de interacción para vigas-columnas, expresada en términos de las tensiones en las alas calculadas a partir de un análisis elástico (*White 2004*). El término f_{bu} es análogo a la carga axial, y el término f_ℓ es análogo al momento flector dentro de la viga-columna equivalente. El factor 1/3 delante del término f_ℓ de la Ecuación 1 permite obtener una aproximación lineal precisa de la resistencia de la viga-columna equivalente dentro de los límites especificados en el Artículo 6.10.1.6 para f_ℓ .

C6.10.8.1.2

La Ecuación 1 es una aproximación precisa de la resistencia plástica plena de la sección transversal de un ala rectangular solicitada a una combinación de carga vertical y flexión lateral dentro de los límites de la Ecuación 6.10.1.6-1, propuesta originalmente por Hall y Yoo (*1996*).

6.10.8.1.3 Alas con apoyo lateral continuo solicitadas a tracción o compresión

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} \leq \phi_f R_h F_{yf} \quad (6.10.8.1.3-1)$$

6.10.8.2 Resistencia a la flexión del ala de compresión

6.10.8.2.1 Disposiciones generales

La resistencia nominal a la flexión del ala de compresión se deberá tomar como el menor valor entre la resistencia al pandeo local determinada como se especifica en el Artículo 6.10.8.2.2, y la resistencia al pandeo lateral torsional determinada como se especifica en el Artículo 6.10.8.2.3.

C6.10.8.2.1

Todas las ecuaciones para determinar la resistencia a la flexión de las alas de compresión de las secciones doble T se basan consistentemente en la lógica de identificar los dos puntos de anclaje ilustrados en la Figura C1. El punto de anclaje 1 está ubicado en la longitud $L_b = L_p$ para pandeo lateral torsional (LTB) o la esbeltez del ala $b_{fc}/2t_{fc}$ para el pandeo local del ala (FLB) correspondiente al desarrollo de la máxima resistencia potencial a la flexión, indicada en la figura como F_{max} o M_{max} . El punto de anclaje 2 está ubicado en la menor longitud $L_b = L_r$ o esbeltez del ala λ_{rf} para la cual las resistencias para pandeo lateral torsional o pandeo local del ala son determinadas por el pandeo elástico. En la totalidad del Artículo 6.10.8 esta resistencia se toma como F_{yr} = menor valor entre $0.7F_{yc}$ o F_{yw} , pero nunca menor que $0.5F_{yc}$. A excepción de las secciones híbridas en las cuales F_{yw} es significativamente menor que F_{yc} , $F_{yr} = 0.7F_{yc}$. Este límite corresponde al efecto de una tensión residual nominal en el ala de compresión de $0.3F_{yc}$. El límite de $0.5F_{yc}$ sobre F_{yr} evita situaciones anómalas en algunos tipos de secciones transversales en las cuales la ecuación de pandeo inelástico da una resistencia mayor que la correspondiente curva de pandeo elástico. Además, el límite de $0.5F_{yc}$ es equivalente al valor implícito de F_{yr} que se utiliza en AASHTO (1998). En estos requisitos no se especifican explícitamente ecuaciones de resistencia para FLB elástico debido a que los límites del Artículo 6.10.2.2 evitan el FLB elástico para resistencias mínimas a la fluencia especificadas menores o iguales que $F_{yc} = 620$ MPa. Está permitido utilizar la ecuación de FLB inelástico para el pequeño rango en el cual $b_{fc}/2t_{fc}$ potencialmente puede ser mayor que λ_{rf} para resistencias mínimas a la fluencia especificadas menores o iguales que $F_{yc} = 690$ MPa.

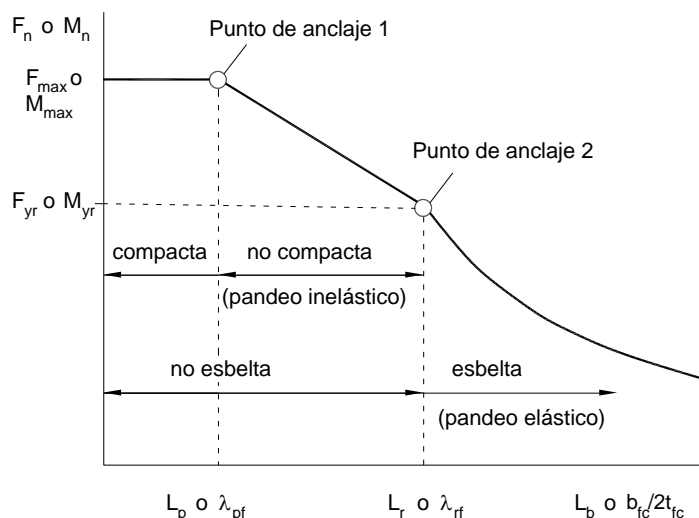


Figura C6.10.8.2.1-1 Forma básica de todas las ecuaciones para determinar la resistencia a la flexión de las alas de compresión de las secciones doble Te

6.10.8.2.2 Resistencia al pandeo local

La resistencia al pandeo local del ala de compresión se deberá tomar como:

- Si $\lambda_f \leq \lambda_{pf}$, entonces:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (6.10.8.2.2-1)$$

- Caso contrario:

$$F_{nc} = \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_b R_h F_{yc} \quad (6.10.8.2.2-2)$$

donde:

λ_f = relación de esbeltez para el ala de compresión

$$= \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} \quad (6.10.8.2.2-3)$$

λ_{pf} = relación de esbeltez límite para un ala compacta

$$= 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.10.8.2.2-4)$$

λ_{rf} = relación de esbeltez límite para un ala no compacta

C6.10.8.2.2

La Ecuación 4 define el límite de esbeltez para un ala compacta, mientras que la Ecuación 5 da el límite de esbeltez para un ala no compacta. La resistencia nominal a la flexión de una sección con un ala compacta es independiente de la esbeltez del ala, mientras que la resistencia a la flexión de una sección con un ala no compacta se expresa como una función lineal de la esbeltez del ala como se ilustra en la Figura C6.10.8.2.1-1. El límite de esbeltez para ala compacta es el mismo es igual que el que especifican AISC (1999) y AASHTO (1996, 1998). La siguiente tabla indica este límite de esbeltez para diferentes grados de acero:

Tabla C6.10.8.2.2-1 Relación de esbeltez límite para un ala compacta

| F_{yc} (MPa) | λ_{pf} |
|----------------|----------------|
| 250 | 10.8 |
| 345 | 9.2 |
| 485 | 7.7 |
| 620 | 6.8 |
| 690 | 6.5 |

La Ecuación 5 se basa conservadoramente en el coeficiente de pandeo más general $k_c = 0.35$. A excepción de las secciones híbridas con $F_{yw} < 0.7F_{yc}$, el término F_{yr} en la Ecuación 5 es siempre igual a $0.7F_{yc}$.

$$= 0.56 \sqrt{\frac{E}{F_{yr}}} \quad (6.10.8.2.2-5)$$

donde:

F_{yr} = tensión en el ala de compresión cuando se inicia la fluencia nominal dentro de la sección transversal, incluyendo los efectos de las tensiones residuales pero sin considerar la flexión lateral del ala de compresión, tomado como el menor valor entre $0.7F_{yc}$ y F_{yw} , pero nunca menor que $0.5F_{yc}$

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

6.10.8.2.3 Resistencia al pandeo lateral torsional

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento es prismático, la resistencia al pandeo lateral torsional del ala de compresión se deberá tomar como:

- Si $L_b \leq L_p$, entonces:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (6.10.8.2.3-1)$$

- Si $L_p < L_b \leq L_r$, entonces:

$$F_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right] R_b R_h F_{yc} \leq R_b R_h F_{yc} \quad (6.10.8.2.3-2)$$

- Si $L_b > L_r$, entonces:

$$F_{nc} = F_{cr} \leq R_b R_h F_{yc} \quad (6.10.8.2.3-3)$$

donde:

L_b = longitud no arriostrada (mm)

L_p = longitud no arriostrada límite para alcanzar la resistencia nominal a flexión $R_b R_h F_{yc}$ bajo flexión uniforme (mm)

$$= 1.0 r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.10.8.2.3-4)$$

C6.10.8.2.3

La Ecuación 4 define el límite para la longitud no arriostrada compacta para un elemento sujeto a flexión uniforme respecto del eje mayor, mientras que la Ecuación 5 define el correspondiente límite para la longitud no arriostrada no compacta. La resistencia nominal a la flexión de un elemento arriostrado en o por debajo del límite correspondiente a sección compacta es independiente de la longitud no arriostrada, mientras que la resistencia a la flexión de un elemento arriostrado en o por debajo del límite correspondiente a sección no compacta se expresa como una función lineal de la longitud no arriostrada tal como se ilustra en la Figura C6.10.8.2.1-1. El límite dado por la Ecuación 4 es similar al requisito de arriostramiento para uso de las ecuaciones generales de resistencia a la flexión para secciones compactas y/o las ecuaciones de fórmula Q de AASHTO (1998) para $F_{yc} = 345$ MPa. Para valores de F_{yc} más elevados es algo menos restrictivo que el requisito anterior. El límite dado por la Ecuación 4 generalmente es algo más restrictivo que el límite dado por la correspondiente ecuación de L_p en AASHTO (1998) y AISC (1999). El límite dado por la Ecuación 4 se basa en un análisis de regresión lineal dentro de la región correspondiente a la ecuación de pandeo lateral torsional inelástico, ilustrada cualitativamente en la Figura C6.10.8.2.1-1, para un amplio rango de datos obtenidos de ensayos con flexión respecto del eje mayor y en los cuales la longitud efectiva para pandeo lateral torsional es efectivamente 1.0. Observar que la solución más económica no siempre se logra limitando la longitud no arriostrada al valor de L_p para alcanzar la máxima resistencia a la flexión, F_{max} , particularmente si el modificador del gradiente de momentos, C_b , se toma igual a 1.0.

L_r = longitud no arriostrada límite para llegar al inicio de la fluencia nominal en cualquiera de las alas bajo flexión uniforme considerando los efectos de las tensiones residuales en el ala de compresión (mm)

$$= \pi r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.10.8.2.3-5)$$

C_b = modificador del gradiente de momentos. En ausencia de un análisis racional alternativo, C_b se puede calcular de la siguiente manera:

- Para voladizos no arriostrados y para elementos en los cuales $f_{mid}/f_2 > 1$ o $f_2 = 0$:

$$C_b = 1.0 \quad (6.10.8.2.3-6)$$

- Para todos los demás casos:

$$C_b = 1.75 - 1.05 \left(\frac{f_1}{f_2} \right) + 0.3 \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \leq 2.3 \quad (6.10.8.2.3-7)$$

F_{cr} = tensión de pandeo lateral torsional elástico (MPa)

$$= \frac{C_b R_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_t} \right)^2} \quad (6.10.8.2.3-8)$$

r_t = radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional (mm)

$$= \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{D_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \right)}} \quad (6.10.8.2.3-9)$$

donde:

F_{yr} = tensión en el ala de compresión cuando se inicia la fluencia nominal en la sección transversal, incluyendo los efectos de las tensiones residuales pero sin considerar la flexión lateral del ala de compresión, tomada como el menor valor entre $0.7F_{yc}$ y F_{yw} , pero nunca menor que $0.5F_{yc}$

D_c = profundidad del alma comprimida en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

La Ecuación 8 es una simplificación conservadora de la Ecuación A6.3.3-8, que da la solución exacta basada en la teoría de vigas para la resistencia al pandeo lateral torsional elástico de una sección doble Te doblemente simétrica (Timoshenko y Gere 1961) para el caso de flexión uniforme respecto del eje mayor cuando C_b es igual a 1.0 y cuando r_t se define como:

$$r_t = \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(\frac{h}{d} + \frac{1}{3} \frac{D_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \frac{D^2}{hd} \right)}} \quad (C6.10.8.2.3-1)$$

La Ecuación 9 es una simplificación de la ecuación de r_t anterior que se obtiene suponiendo $D = h = d$. Para las secciones de alas gruesas, la Ecuación 9 da un valor de r_t que puede tener hasta tres o cuatro por ciento de conservadurismo con respecto a la ecuación exacta. Se permite usar la Ecuación C1 para los cálculos realizados con ayuda de software o si el Ingeniero requiere un cálculo más preciso de la resistencia al pandeo lateral torsional elástico. La otra simplificación clave en la Ecuación 8 es que se asume que la inercia torsional de Saint-Venant, J , es igual a cero. Esta simplificación es prudente para casos tales como el de las vigas rigidizadas longitudinalmente con valores de esbeltez del alma que se aproximan al límite máximo de la Ecuación 6.10.2.1.2-1. Para estos tipos de secciones la contribución de J a la resistencia al pandeo lateral torsional elástico es generalmente pequeña y muy probablemente se vea reducida debido a la distorsión del alma que adopta una forma de S y la correspondiente inclinación del ala de compresión con respecto al ala de tracción. Sin embargo, para las secciones cuya de esbeltez del alma se aproxima al límite correspondiente a sección no compacta dado por la Ecuación 6.10.6.2.3-1 y listadas en la Tabla C6.10.1.10.2-2 para diferentes resistencias a la fluencia, la hipótesis de $J = 0$ es conveniente pero tiende a ser conservadora. Para las típicas secciones doble Te utilizadas en flexión con $D/b_{fc} > 2$ el efecto de esta hipótesis sobre la magnitud de la longitud no arriostrada límite para secciones no compactas L_r es generalmente menor que 10 por ciento (White et al. 2001).

Para el caso de $J > 0$ y flexión uniforme, y considerando secciones doble Te con $D/b_f > 2$, $b_{fc}/2t_{fc} > 5$, y $L_b = L_r$, el error en la Ecuación A6.3.3-6 respecto de la solución exacta en base a la teoría de vigas varía desde 12 por ciento del lado conservador hasta 2 por ciento del lado no conservador (White 2004). Una ecuación comparable de AASHTO (1998) basada en I_{yc} da errores que varían desde 16 por ciento del lado conservador hasta 14 por ciento del lado no conservador para el mismo conjunto de parámetros estudiados.

Las Ecuaciones 8 y A6.3.3-8 proporcionan una única

f_{mid} = tensión sin considerar la flexión lateral del ala a la mitad de la longitud no arriostrada del ala considerada, calculada a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión (MPa). f_{mid} se deberá calcular considerando las cargas mayoradas. Las tensiones de compresión se deberán considerar positivas, las de tracción negativas.

f_0 = tensión sin considerar la flexión lateral del ala en el punto de arriostramiento opuesto al punto correspondiente a f_2 , calculada a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión (MPa). f_0 se deberá calcular considerando las cargas mayoradas. Las tensiones de compresión se deberán considerar positivas, las de tracción negativas.

$$f_1 = 2f_{mid} - f_2 \geq f_0 \quad (6.10.8.2.3-10)$$

f_2 = salvo las excepciones aquí indicadas, mayor de las tensiones de compresión sin considerar la flexión lateral en cualquiera de los extremos de una longitud no arriostrada del ala considerada, calculada a partir del valor crítico de la envolvente de momentos. f_2 se deberá calcular considerando las cargas mayoradas. El valor de f_2 es siempre positivo, a menos que en ambos extremos de la longitud no arriostrada del ala considerada la tensión sea nula o de tracción, en cuyo caso f_2 se deberá tomar igual a cero (MPa)

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento consiste en secciones monosimétricas no compuestas y está sujeto a flexión con curvatura doble, a menos que se considere que el ala superior tiene apoyo lateral continuo, se deberá verificar la resistencia al pandeo lateral torsional de ambas alas.

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento no es prismático, la resistencia al pandeo lateral torsional del ala de compresión se puede tomar como la menor de las resistencias dentro de la longitud no arriostrada considerada determinadas a partir de las Ecuaciones 1, 2 o 3, según corresponda, suponiendo que la longitud no arriostrada es

representación consistente de la resistencia al pandeo lateral torsional elástico para todos los tipos de elementos de sección doble Te. Estas ecuaciones dan una representación conservadora de la resistencia al pandeo lateral torsional elástico de los elementos compuestos de sección doble Te en flexión negativa, ya que desprecian la restricción que la rigidez lateral y torsional del tablero le proporcionan al ala de compresión inferior. En general, la distorsión del alma reduce los efectos de esta restricción. Se ha juzgado que los beneficios de esta restricción no justifican la complejidad adicional asociada con una solución general del pandeo distorsional, particularmente si se sospecha que la restricción que proporciona el tablero es menor que la necesaria para proveerle a las vigas doble Te de un puente relativamente grande una fijación efectiva contra la torsión.

El Ingeniero debe observar la importancia del término del alma D_{ctw} dentro de la Ecuación 9. Ediciones anteriores de las Especificaciones frecuentemente utilizaban el radio de giro exclusivamente del ala de compresión, $r_{yc} = b_{fc}/\sqrt{12}$, en las ecuaciones de diseño para pandeo lateral torsional. Esta aproximación puede resultar en predicciones significativamente no conservadoras con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente o mediante análisis por elementos finitos. El término del alma en la Ecuación 9 considera los efectos desestabilizadores de la compresión por flexión dentro del alma.

Si en la Ecuación 9 $D_{ctw}/b_{fc}t_{fc}$ se toma como un valor representativo igual a 2.0, esta ecuación se reduce a $0.22b_{fc}$. En base a esta hipótesis y $F_{yc} = 345$ MPa, la longitud no arriostrada límite para secciones no compactas dada por la Ecuación 5 se simplifica a $L_r = 20b_{fc}$. En base a estas mismas hipótesis, las Ecuaciones de los Artículos B6.2.4 y D6.4 dan límites para L_b que en general son mayores que $5.4b_{fc}$. El límite dado en el Artículo B6.2.4 es suficiente para permitir la redistribución de momentos en las secciones sobre las pilas interiores de los elementos continuos. El límite dado en el Artículo D6.4 es suficiente para desarrollar F_{max} o M_{max} ilustrados en la Figura C6.10.8.2.1-1 en casos que involucran un gradiente de momentos a lo largo de la longitud no arriostrada para el cual $C_b > 1.0$.

El efecto de la variación del momento a lo largo de la longitud entre puntos de arriostramiento es considerado por medio del modificador del gradiente de momentos, C_b . C_b tiene un valor base de 1.0 cuando el momento y la correspondiente compresión por flexión respecto del eje mayor del ala son constantes en toda la longitud no arriostrada. De manera conservadora, C_b se puede tomar igual a 1.0 para todos los casos, a excepción de ciertas circunstancias poco usuales sin arriostramiento transversal en el tramo tal como se discute a continuación.

El procedimiento para calcular C_b retiene la Ecuación 7 de las Especificaciones anteriores. Sin embargo, se han

prismática. Para las longitudes no arriostradas que contienen una transición a una sección menor a una distancia menor o igual que 20 por ciento de la longitud no arriostrada a partir del punto de arriostramiento con el menor momento, la resistencia al pandeo lateral torsional se puede determinar suponiendo que esta transición no existe.

modificado la definición de cuándo C_b se ha de tomar igual a 1.0 y el cálculo específico de los términos f_1 y f_2 de la Ecuación 7 con el objetivo de eliminar ambigüedades y cubrir varios casos potencialmente importantes en los cuales el anterior cálculo de C_b era significativamente no conservador con respecto a las soluciones más refinadas. Un ejemplo específico de esto sería un elemento simplemente apoyado que sopota tanto su peso propio como una carga transversal uniforme, pero que sólo está arriostrado en sus extremos y a la mitad de su longitud. Este caso ideal es representativo de potenciales condiciones de armado en las cuales el número de marcos transversales dentro de la superestructura es mínimo y la superestructura está siendo considerada en su condición no compuesta, antes que la losa de hormigón colada in situ se haya endurecido. Para este caso las Especificaciones anteriores dan un valor de C_b igual a 1.75, mientras que las ecuaciones más precisas de AISC (1999) dan un valor de C_b igual a 1.30. El menor valor de C_b igual a 1.30 se debe a la forma parabólica del diagrama de momentos, y al hecho de que dentro de las longitudes no arriostradas la compresión en el ala es significativamente mayor que la variación lineal implícitamente supuesta en la anterior aplicación de la Ecuación 7.

El procedimiento para calcular C_b indicado en estos requisitos considera todo lo anterior utilizando las tensiones debidas a las cargas mayoradas a la mitad de la longitud no arriostrada del ala considerada, f_{mid} . Si f_{mid} es mayor o igual que la mayor tensión de compresión en el ala debida a las cargas mayoradas en cualquiera de los extremos de la longitud no arriostrada, f_2 , C_b se toma igual a 1.0. Además, en las raras situaciones en las cuales en ambos extremos de la longitud no arriostrada la tensión en el ala es nula o de tracción, caso para el cual f_2 se define como cero, C_b se toma igual a 1.0. Este tipo de situaciones ocurren solamente para elementos con longitudes no arriostradas muy largas, como por ejemplo tramos simplemente apoyados o continuos sin arriostramiento transversal dentro del tramo. Para los voladizos no arriostrados C_b también se toma igual a 1.0, lo cual es consistente con AASHTO (1998) y AISC (1999).

En todos los demás casos los efectos beneficiosos del gradiente de momentos existen y son calculables. En estos casos la Ecuación 7 requiere aproximar la variación de la tensión a lo largo de la longitud no arriostrada como el valor más crítico entre: (1) una recta que pase por f_2 y f_{mid} , o (2) una recta que pase entre f_2 y la tensión calculada en el ala considerada en el extremo opuesto de la longitud no arriostrada, f_0 , cualquiera sea la que produzca el menor valor de C_b . La intercepción de esta variación lineal de la tensión más crítica supuesta en el extremo opuesto a f_2 se denomina f_1 . Para el ejemplo específico citado, con este procedimiento se obtiene un valor de C_b igual a 1.30, valor

idéntico al valor de C_b pronosticado por la ecuación más refinada especificada por AISC (1999). En todos los casos en los cuales f_{mid} es menor que el promedio de f_0 y f_2 , en la Ecuación 7 f_1 y f_2 son siempre iguales a las tensiones en los extremos de la longitud no arriostrada en el ala considerada.

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento consiste en secciones doble Te monosimétricas no compuestas y está sujeto a flexión con curvatura doble, generalmente es necesario verificar la resistencia al pandeo lateral torsional para ambas alas, a menos que se considere que el ala superior tiene apoyo lateral continuo. Debido a que en este tipo de secciones las alas son de diferentes tamaños, es posible que la resistencia al pandeo lateral torsional sea gobernada por la compresión en el ala más pequeña, aun cuando esta tensión de compresión puede ser menor que la máxima compresión en el ala de mayor tamaño. Para estos casos el enfoque especificado generalmente permite obtener valores de C_b de precisos a conservadores. Para las secciones altamente monosimétricas y flexión con curvatura doble, los valores de C_b de entre 1.75 y 2.3 que se obtienen usando estos requisitos son frecuentemente conservadores con respecto a los cálculos refinados de la resistencia al pandeo lateral torsional, como por ejemplo los indicados por Kitipornchai y Trahair (1986). Sin embargo, estos requisitos son menos conservadores que las resistencias estimadas usando la versión refinada de la ecuación de AISC (1999) para C_b propuesta por Helwig et al. (1997) cuando los efectos de las cargas transversales son pequeños y la variación del momento a lo largo de la longitud no arriostrada es aproximadamente lineal. Para otros casos que involucran efectos significativos de las cargas transversales, la ecuación refinada de AISC recomendada por Helwig et al. (1997) da resultados más precisos y menos conservadores para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento está sujeto a flexión con curvatura doble. No es necesario verificar la resistencia al pandeo lateral torsional del ala superior de las secciones doble Te compuestas en el caso de longitudes no arriostradas en las cuales el elemento está sujeto a flexión con curvatura doble, ya que dicha ala tiene apoyo lateral continuo.

Para aplicar en forma estricta los requisitos sobre C_b sería necesario considerar los momentos concurrentes a lo largo de la longitud no arriostrada. Para ello sería necesario calcular (1) el máximo valor posible de f_2 en el punto de arriostramiento con la mayor tensión de compresión usando el valor crítico de la envolvente de momentos, junto con el cálculo de f_{mid} y f_0 usando los momentos concurrentes, y (2) el máximo valor posible de f_{mid} en compresión usando el valor crítico de la envolvente de momentos, junto con el cálculo de f_0 y f_2 usando los momentos concurrentes. Sin embargo, debido a que normalmente en el diseño no se hace un seguimiento de los momentos concurrentes, para

calcular estas tensiones siempre es conveniente y conservador utilizar los valores de momento correspondientes al caso más desfavorable. Para el cálculo de f_2 el caso más desfavorable es el valor crítico de la envolvente de momentos, o el momento que ocasiona el mayor valor de f_2 en el ala considerada. Los momentos más desfavorables usados para calcular f_0 y f_{mid} son los valores que se obtienen de las envolventes de momentos que producen la mayor tensión de compresión, o la menor tensión de tracción si el punto jamás está en compresión, dentro del ala considerada en cada una de estas ubicaciones. El uso de los momentos correspondientes al caso más desfavorable para calcular f_2 , f_{mid} y f_0 es siempre conservador, ya que para ninguna de las posibles cargas concurrentes puede existir una distribución de tensiones más crítica en toda la longitud no arriostrada. Esto incluye cualquier condición potencial en la cual la tensión sea menor en las ubicaciones de f_2 o f_{mid} , pero en la cual el gradiente de momentos también sea menor, produciendo así un valor de C_b más bajo. Además, utilizar los momentos concurrentes para calcular f_0 y f_{mid} para la carga con la que se obtiene el mayor valor de f_2 siempre resultaría en un valor de C_b más elevado para esta carga específica. De manera similar, utilizar los momentos concurrentes para calcular f_2 y f_0 para la carga que produce el mayor valor de compresión de f_{mid} siempre resultaría en un valor de C_b más elevado para esta carga específica.

Los lineamientos arriba indicados también son aplicables al cálculo de C_b para secciones de alma compacta y no compacta diseñadas de acuerdo con el Artículo A6.3.3. Se recomienda utilizar las tensiones de flexión respecto del eje mayor del ala de compresión para calcular C_b en el caso de las secciones diseñadas de acuerdo con el Artículo 6.10.8, ya que esta práctica refleja mejor el hecho de que en las vigas compuestas los momentos flectores por carga permanente y sobrecarga debidos a las cargas mayoradas se aplican a diferentes secciones. Sin embargo, por motivos de conveniencia, en lugar de utilizar la relación entre las tensiones en el ala de compresión se puede utilizar la relación de los momentos flectores respecto del eje mayor en los puntos de arriostramiento, siempre que el Ingeniero considere que esto no afectará significativamente el valor final de C_b calculado. Para las secciones de alma compacta y no compacta diseñadas de acuerdo con el Artículo A6.3.3 se especifica que para calcular C_b se utilicen los momentos flectores respecto del eje mayor. En la Ecuación A6.3.3-7 se utilizan momentos debido a que para este tipo de secciones el efecto global de la aplicación de los momentos a las diferentes secciones es menos crítico.

Cuando C_b es mayor que 1.0, lo que indica la presencia de un importante efecto beneficioso del gradiente de momentos, la resistencia al pandeo lateral torsional alternativamente se puede calcular aplicando los

procedimientos equivalentes especificados en el Artículo D6.4.1. Cuando C_b es mayor que 1.0, tanto las ecuaciones de este Artículo como las del Artículo D6.4.1 permiten que se alcance F_{max} de la Figura C6.10.8.2.1-1 en longitudes no arriostradas más largas. Los procedimientos del Artículo D6.4.1 permiten que el Ingeniero se enfoque directamente en la máxima longitud no arriostrada en la cual la resistencia a la flexión es igual a F_{max} . Se recomienda fuertemente utilizar estos procedimientos equivalentes cuando en el diseño se utilicen valores de C_b mayores que 1.0.

Aunque en general el cálculo de un C_b mayor que 1.0 podría hacer que la resistencia flexional dependiera de la carga aplicada y, en consecuencia, podría provocar complicaciones posteriores al determinar las capacidades de carga, en la mayoría de los casos un valor de C_b apenas un poco mayor que 1.0 es suficiente para desarrollar la máxima resistencia a la flexión F_{max} . Siempre que la combinación de la separación entre puntos de arriostramiento y $C_b > 0$ sea suficiente para desarrollar F_{max} , la resistencia a la flexión es independiente de las cargas aplicadas. Por tanto, cuando se utiliza $C_b > 1.0$, se recomienda que las longitudes no arriostradas, L_b , en las ubicaciones críticas se seleccionen de manera que esta condición se satisfaga en la condición final de la construcción. Los requisitos de este Artículo tienden a proporcionar valores de C_b que son de precisos a significativamente conservadores. Por lo tanto, si en el diseño se siguen los lineamientos indicados, es poco probable que la resistencia a la flexión difiera de F_{max} para cualquier determinación de las capacidades de carga, particularmente si el Ingeniero calcula C_b de manera más refinada para determinar estas capacidades de carga. Galambos (1998) presenta otras formulaciones más refinadas que se pueden utilizar para calcular C_b .

Tanto las ecuaciones para C_b de estos requisitos como las de AISC (1999) desprecian el efecto de la ubicación de la carga aplicada con respecto a la mitad de la altura de la sección. En ciertas situaciones poco usuales sin arriostramiento transversal intermedio y para voladizos no arriostrados con una carga significativa aplicada al nivel del ala superior, el Ingeniero debería considerar incluir los efectos de la altura de la carga dentro del cálculo de C_b . En estos casos los valores de C_b asociados pueden ser menores que 1.0. Galambos (1998) proporciona ecuaciones que permiten considerar los efectos de la altura de la carga tanto en tramos simples como en tramos continuos, mientras que Doswell (2002) proporciona soluciones que permiten considerar estos efectos en voladizos no arriostrados. Cuando $C_b < 1.0$, es posible que F_n sea menor que F_{max} en la Figura C6.10.8.2.1-1 aun cuando L_b sea menor o igual que L_p . Por lo tanto, para $C_b < 1.0$, la resistencia se debería calcular usando la Ecuación 2 cuando L_b sea menor o igual

que L_r .

Para el caso de una rehabilitación o bajo circunstancias extraordinarias, el Ingeniero podría considerar modificar L_b aplicando un factor de longitud elástica efectiva para pandeo lateral torsional. Galambos (1998) y Nethercot y Trahair (1976) presentan un método sencillo que se puede utilizar para realizar este cálculo.

Galambos (1998) proporciona lineamientos generales para el diseño para estabilidad de los sistemas de arriostramiento. En el pasado, algunas veces los puntos de contraflexión eran considerados puntos de arriostramiento cuando en las ecuaciones de resistencia al pandeo lateral torsional no se incluía la influencia del gradiente de momentos. En ciertos casos esta práctica puede llevar a una estimación sustancialmente no conservadora de la resistencia a la flexión. Estas Especificaciones no pretenden que los puntos de contraflexión sean considerados como puntos de arriostramiento. La influencia del gradiente de momentos se puede considerar correctamente usando C_b , mientras que el efecto de la restricción proporcionada por segmentos adyacentes no arriostrados se puede considerar usando un factor de longitud efectiva menor que 1.0.

En el caso de flexión uniforme, la reducción de la resistencia al pandeo lateral torsional elástico debido a la transición a una sección menor es de aproximadamente 5 por ciento si la transición está ubicada a una distancia igual al 20 por ciento de la longitud no arriostrada a partir de uno de los puntos de arriostramiento y el momento de inercia lateral del ala en la sección menor es igual a un medio del valor correspondiente en la sección mayor (Carskaddan y Schilling 1974). Para casos de gradientes de momentos en los cuales el momento flector mayor ocurre dentro de la sección mayor, y/o cuando la transición entre secciones está más próxima al punto de arriostramiento, y/o cuando el momento de inercia lateral del ala de la sección menor es mayor que un medio del correspondiente valor en la sección mayor, la reducción de la resistencia al pandeo lateral torsional es menor que 5 por ciento. Debido a que las transiciones entre secciones típicamente se ubican en regiones en las cuales hay un gradiente de momentos significativo, el efecto de la transición sobre la resistencia al pandeo lateral torsional se puede despreciar siempre que se satisfagan las condiciones especificadas. Para un caso con más de una transición, cualquier transición ubicada en una distancia menor o igual que 20 por ciento de la longitud no arriostrada a partir del punto de arriostramiento con el menor momento puede ser ignorada, y la resistencia al pandeo lateral torsional de la longitud no arriostrada no prismática restante se puede calcular como la menor resistencia en base a las secciones restantes.

Para las longitudes no arriostradas que contienen una transición a una sección menor a una distancia mayor que 20 por ciento de la longitud no arriostrada a partir del punto

de arriostramiento con el menor momento, la resistencia al pandeo lateral torsional se debería tomar como la menor resistencia, F_{nc} , dentro de la longitud no arriostrada considerada. Esta resistencia se debe comparar con el mayor valor de la tensión de compresión debida a las cargas mayoradas, f_{bu} , en la totalidad de la longitud no arriostrada calculada usando las propiedades reales de la sección. En este caso el modificador del gradiente de momentos, C_b , se debería tomar igual a 1.0 y no se debería aplicar un factor de longitud efectiva a L_b .

6.10.8.3 Resistencia a la flexión del ala de tracción

La resistencia nominal a la flexión del ala de tracción se deberá tomar como:

$$F_{nt} = R_h F_{yt} \quad (6.10.8.3-1)$$

donde:

R_b = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

6.10.9 Resistencia al corte

6.10.9.1 Disposiciones generales

En el Estado Límite de Resistencia las almas deberán satisfacer:

$$V_u = \phi_v V_n \quad (6.10.9.1-1)$$

donde:

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

V_n = resistencia nominal al corte determinada como se especifica en los Artículos 6.10.9.2 y 6.10.9.3 para almas no rigidizadas y rigidizadas, respectivamente (N)

V_u = corte en el alma en la sección considerada debido a las cargas mayoradas (N)

Los rigidizadores transversales intermedios se deberán diseñar como se especifica en el Artículo 6.10.11.1. Los rigidizadores longitudinales se deberán diseñar como se especifica en el Artículo 6.10.11.3.

Los paneles interiores de las almas de los elementos de sección doble Te no híbridos e híbridos:

- Que no tengan un rigidizador longitudinal y en los

C6.10.9.1

Este artículo se aplica a:

- Secciones sin rigidizadores,
- Secciones que solamente tienen rigidizadores transversales, y
- Secciones que tienen tanto rigidizadores transversales como rigidizadores longitudinales.

A continuación se ilustra un diagrama de flujo que describe la determinación de la resistencia al corte de las secciones doble Te.

cuales la separación de los rigidizadores transversales no sea mayor que $3D$, o

- Que tengan uno o más rigidizadores longitudinales y en los cuales la separación de los rigidizadores transversales no sea mayor que $1.5D$

se deberán considerar rigidizados, y por lo tanto se les aplicarán los requisitos del Artículo 6.10.9.3. Caso contrario se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.9.2.

Para las almas rigidizadas, los requisitos para los paneles extremos serán como se especifica en el Artículo 6.10.9.3.3.

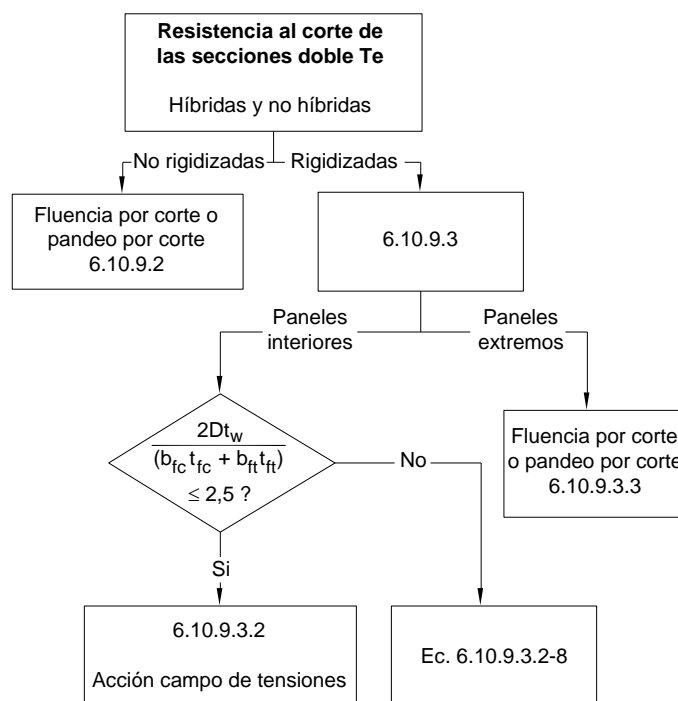


Figura C6.10.9.1-1 Diagrama de flujo para el diseño al corte de las secciones doble Te

Los paneles de alma interiores no rigidizados y rigidizados se definen de acuerdo con los requisitos sobre máxima separación de los rigidizadores especificados en el presente artículo.

La resistencia nominal al corte de los paneles de alma no rigidizados tanto en elementos no híbridos como en elementos híbridos se define ya sea en función de la fluencia por corte o del pandeo por corte, dependiendo de la relación de esbeltez del alma, tal como se especifica en el Artículo 6.10.9.2.

La resistencia nominal al corte de los paneles de alma interiores rigidizados tanto de los elementos no híbridos como de los elementos híbridos, cuando la sección en todo el panel se dimensiona de manera que satisfaga la Ecuación 6.10.9.3.2-1, se define por la sumatoria de la resistencia a la fluencia por corte o al pandeo por corte más la resistencia postpandeo debida a la acción del campo de tensiones, tal como se especifica en el Artículo 6.10.9.3.2. Caso contrario, la resistencia al corte se toma como la resistencia al corte dada por la Ecuación 6.10.9.3.2-8. Las Especificaciones anteriores no reconocían el potencial que poseen los paneles de las almas de los elementos híbridos de desarrollar resistencia postpandeo debido a la acción del campo de tensiones.

Para los elementos no híbridos e híbridos, la resistencia nominal al corte de los paneles extremos de las almas rigidizadas se define ya sea por la fluencia por corte o el pandeo por corte, como se especifica en el Artículo 6.10.9.3.3.

6.10.9.2 Resistencia nominal de las almas no rigidizadas

La resistencia nominal al corte de las almas no rigidizadas se deberá tomar como:

$$V_n = V_{cr} = CV_p \quad (6.10.9.2-1)$$

donde:

$$V_p = 0.58F_{yw}Dt_w \quad (6.10.9.2-2)$$

donde:

C = relación entre la resistencia al pandeo por corte y la resistencia a la fluencia por corte determinada mediante las Ecuaciones 6.10.9.3.2-4, 6.10.9.3.2-5 o 6.10.9.3.2-6, según corresponda, tomando el coeficiente de pandeo por corte, k , igual a 5.0

V_{cr} = resistencia al pandeo por corte (N)

V_n = resistencia nominal corte (N)

V_p = fuerza de corte plástico (N)

6.10.9.3 Resistencia nominal de las almas rigidizadas

6.10.9.3.1 Disposiciones generales

La resistencia nominal al corte de los paneles de alma interiores rigidizados transversalmente o transversal y longitudinalmente deberá ser como se especifica en el Artículo 6.10.9.3.2. La resistencia nominal al corte de los paneles de alma extremos rigidizados transversalmente o transversal y longitudinalmente deberá ser como se especifica en el Artículo 6.10.9.3.3. Para determinar la resistencia nominal al corte de los paneles de alma con rigidizadores longitudinales se deberá utilizar la profundidad total, D . La separación requerida entre rigidizadores transversales se deberá calcular usando el corte máximo en el panel.

Los rigidizadores deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.10.11.

6.10.9.3.2 Paneles interiores

La resistencia nominal al corte de un panel de alma interior que satisface los requisitos del Artículo 6.10.9.1 y en el cual la sección a lo largo de la totalidad del panel está dimensionada de manera que:

C6.10.9.2

No está permitido considerar la acción del campo de tensiones (*Basler 1961*) en los paneles de alma no rigidizados. La resistencia elástica a la fluencia por corte o al pandeo por corte se calcula como el producto de la constante C especificada en el Artículo 6.10.9.3.2 por la fuerza de corte plástico, V_p , dada por la Ecuación 2. La fuerza de corte plástico es igual al área del alma por la resistencia a la fluencia al corte supuesta de $F_{yw}/\sqrt{3}$. El coeficiente de pandeo por corte, k , a utilizar para calcular la constante C se define como 5.0 para paneles de alma no rigidizados, lo cual constituye una aproximación conservadora del valor exacto igual a 5.35 correspondiente a una franja infinitamente larga con sus bordes simplemente apoyados (*Timoshenko y Gere 1961*).

C6.10.9.3.1

Los rigidizadores longitudinales dividen un panel de alma en subpaneles. En el trabajo de Cooper (1967), la resistencia al corte de la totalidad del panel se toma igual a la sumatoria de la resistencia al corte de los subpaneles. Sin embargo, la contribución a la resistencia al corte de un único rigidizador longitudinal ubicado en su posición óptima para flexión es relativamente pequeña. Por lo tanto, de manera conservadora se especifica que al calcular la resistencia al corte de la placa de alma se debe despreciar la influencia del rigidizador longitudinal.

C6.10.9.3.2

Los paneles de alma interiores rigidizados de los elementos no híbridos e híbridos que satisfacen la Ecuación 1 son capaces de desarrollar resistencia al corte postpandeo debido a la acción del campo de tensiones (*Basler 1961*;

$$\frac{2Dt_w}{(b_{fc}t_{fc} + b_{ft}t_{ft})} \leq 2.5 \quad (6.10.9.3-2-1)$$

se deberá tomar como:

$$V_n = V_p \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1 + \frac{d_o}{D}}} \right] \quad (6.10.9.3-2-2)$$

donde:

$$V_p = 0.58F_{yw}Dt_w \quad (6.10.9.3-2-3)$$

y donde:

d_o = separación entre rigidizadores transversales (mm)

V_n = resistencia nominal al corte del panel de alma (N)

V_p = fuerza de corte plástico (N)

C = relación entre la resistencia al pandeo por corte y la resistencia a la fluencia por corte

La relación C se deberá determinar como se especifica a continuación:

- Si $\frac{D}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}$, entonces:

$$C = 1.0 \quad (6.10.9.3.2-4)$$

- Si $1.12 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}} < \frac{D}{t_w} \leq 1.40 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}$, entonces:

$$C = \frac{1.12}{\frac{D}{t_w}} \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}} \quad (6.10.9.3.2-5)$$

- Si $\frac{D}{t_w} > 1.40 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}$, entonces:

White 2004). Esta acción es análoga a la de las diagonales traccionadas de una cercha Pratt. La resistencia al corte de estos paneles se puede calcular sumando las contribuciones de la acción de viga y la acción del campo de tensiones posterior al pandeo. La expresión resultante es la que se indica en la Ecuación 2, donde el primer término dentro del paréntesis se relaciona ya sea con la fuerza de fluencia por corte o de pandeo por corte y el segundo término se relaciona con la fuerza del campo de tensiones posterior al pandeo. Si no se satisface la Ecuación 1, el área total de las alas dentro del panel es pequeña en relación con el área del alma y generalmente no es posible que se desarrolle la totalidad de la resistencia postpandeo (*White 2004*). Sin embargo, en estos casos es conservador usar la resistencia postpandeo dada por la Ecuación 8. La Ecuación 8 da la solución despreciando el aumento de tensión dentro de las cuñas del panel del alma fuera de la franja de tracción implícitamente incluida en el modelo de Basler (*Gaylord 1963; Salmon y Johnson 1996*).

Dentro de las restricciones especificadas por las Ecuaciones 1 y 6.10.2.2-2 en general, y por el Artículo 6.10.9.3.1 para las vigas doble T rigidizadas longitudinalmente en particular, y siempre que al verificar la resistencia a la flexión se utilice el momento máximo dentro del panel, *White (2004)* demuestra que las ecuaciones de estas Especificaciones abarcan en buena medida la resistencia de un conjunto razonablemente exhaustivo de resultados experimentales sin necesidad de considerar la interacción entre momento y corte. Además, los requisitos sobre resistencia al corte de estas Especificaciones desprecian la resistencia al corte adicional y anclaje de la acción del campo de tensiones que proveen los tableros compuestos. Asimismo, típicamente para el diseño se utilizan los valores máximos de las envolventes de momentos y cortes, mientras que los valores del máximo momento y el máximo corte concurrente tienden a ser menos críticos. Estos factores proveen un margen de seguridad adicional más allá de los niveles de seguridad suficientes que se obtendrían en caso que estos factores no existieran. Por este motivo, estas Especificaciones no exigen los requisitos relacionados con los efectos de la interacción entre momento y corte que se exigían anteriormente.

El coeficiente C es igual a la relación entre la tensión de pandeo elástico del panel, calculada suponiendo condiciones de borde simplemente apoyado, y la resistencia a la fluencia por corte supuesta igual a $F_{yw}/\sqrt{3}$. La Ecuación 6 es aplicable solamente para valores de C menores o iguales que 0.8 (*Basler 1961*). Por encima de 0.8, los valores de C están dados por la Ecuación 5 hasta llegar a una relación de esbeltez límite para la cual la tensión de pandeo por corte es igual a la resistencia a la fluencia por corte y $C = 1.0$. La Ecuación 7 para el coeficiente de

$$C = \frac{1.57}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \left(\frac{Ek}{F_{yw}} \right) \quad (6.10.9.3.2-6)$$

donde:

k = coeficiente de pandeo por corte

$$= 5 + \frac{5}{\left(\frac{d_o}{D}\right)^2} \quad (6.10.9.3.2-7)$$

Caso contrario, la resistencia nominal al corte se deberá tomar de la siguiente manera:

$$V_n = V_p \left[C + \frac{0.87(1-C)}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{d_o}{D}\right)^2} + \frac{d_o}{D} \right)} \right] \quad (6.10.9.3.2-8)$$

6.10.9.3.3 Paneles extremos

La resistencia nominal al corte de un panel de alma extremo se deberá tomar como:

$$V_n = V_{cr} = CV_p \quad (6.10.9.3.3-1)$$

donde:

$$V_p = 0.58F_{yw}Dt_w \quad (6.10.9.3.3-2)$$

donde:

C = relación entre la resistencia al pandeo por corte y la resistencia a la fluencia por corte determinada mediante las Ecuaciones 6.10.9.3.2-4, 6.10.9.3.2-5 o 6.10.9.3.2-6, según corresponda

V_{cr} = resistencia al pandeo por corte (N)

V_p = fuerza de corte plástico (N)

La separación de los rigidizadores transversales en los paneles extremos con o sin rigidizadores longitudinales no deberá ser mayor que $1.5D$.

6.10.10 Conectores de corte

pandeo por corte es una simplificación de dos ecuaciones exactas para k que dependen de la relación de aspecto del panel. Los coeficientes que aparecen en las Ecuaciones 4 a 6 han sido modificados ligeramente con respecto a los valores indicados en Especificaciones anteriores a fin de corregir errores de redondeo.

Debido a que, de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.2.1.1, la esbeltez de las almas sin rigidizadores longitudinales está limitada a 150, el requisito referente a la manipulación de paneles de alma sin rigidizadores longitudinales ya no es necesario y por lo tanto ha sido eliminado de estas Especificaciones.

C6.10.9.3.3

El corte en los paneles extremos adyacentes a los apoyos simples se limita ya sea a la resistencia a la fluencia por corte o a la resistencia al pandeo por corte dada por la Ecuación 1 a fin de proveer un anclaje para el campo de tensiones en los paneles interiores adyacentes. El coeficiente de pandeo por corte, k , a utilizar para determinar la constante C de la Ecuación 1 se deberá calcular en base a la separación entre el apoyo y el primer rigidizador adyacente al apoyo, la cual no podrá ser mayor que $1.5D$.

6.10.10.1 Disposiciones generales

En las secciones compuestas se deberán proveer conectores de corte tipo perno o tipo canal en la interfaz entre el tablero de hormigón y la sección de acero para resistir el corte en la interfaz.

Normalmente se deberán proveer conectores de corte en la totalidad de la longitud de los puentes compuestos de un solo tramo. En las regiones de flexión negativa se deberán proveer conectores de corte si se considera que la armadura longitudinal forma parte de la sección compuesta. Caso contrario no será necesario proveer conectores de corte en las regiones de flexión negativa, pero se deberán colocar conectores adicionales en la región donde se encuentran los puntos de contraflexión bajo carga permanente como se especifica en el Artículo 6.10.10.3.

Cuando en las regiones de flexión negativa no se coloquen conectores de corte, la armadura longitudinal se deberá prolongar hacia la región de flexión positiva como se especifica en el Artículo 6.10.1.7.

6.10.10.1.1 Tipos

Los conectores de corte tipo perno y tipo canal se deberán diseñar de acuerdo con los requisitos del presente artículo.

Los conectores de corte deberán ser de un tipo tal que permita compactar adecuadamente el hormigón para garantizar que la totalidad de sus superficies estén en contacto con el hormigón. Los conectores deberán ser capaces de resistir movimientos tanto verticales como horizontales entre el hormigón y el acero.

la relación entre la altura y el diámetro de un conector de corte tipo perno no deberá ser menor que 4.0.

Los conectores de corte tipo canal deberán tener soldaduras de filetes de un tamaño no menor que 5 mm a lo largo de las aristas del canal.

6.10.10.1.2 Separación de los conectores de corte en la dirección de la carga

La separación de los conectores de corte en la dirección de la carga se deberá determinar de manera de satisfacer el Estado Límite de Fatiga, tal como se especifica en los Artículos 6.10.10.2 y 6.10.10.3. El número de conectores de corte resultante no deberá ser menor que el número requerido para satisfacer el Estado Límite de Resistencia tal como se especifica en el Artículo 6.10.10.4.

La separación de los conectores de corte en la dirección de la carga, p , deberá satisfacer:

$$p \leq \frac{nZ_r}{V_{sr}} \quad (6.10.10.1.2-1)$$

C6.10.10.1.2

Los parámetros I y Q se deberán determinar considerando el tablero dentro del ancho de ala efectivo. Sin embargo, en las regiones de flexión negativa, los I y Q se pueden determinar usando la armadura longitudinal dentro del ancho de ala efectivo para momento negativo, a menos que al calcular el rango de la tensión longitudinal se considere que el tablero de hormigón es efectivo en tracción para momento negativo tal como lo permite el Artículo 6.6.1.2.1.

El máximo rango de corte de fatiga se produce colocando la sobrecarga de fatiga inmediatamente a la izquierda y a la derecha del punto considerado. Con la

donde:

V_{sr} = rango de corte horizontal de fatiga por unidad de longitud (N/mm)

$$= \frac{V_f Q}{I} \quad (6.10.10.1.2-2)$$

donde:

I = momento de inercia de la sección compuesta a corto plazo (mm^4)

n = número de conectores de corte en una sección transversal

p = separación de los conectores de corte a lo largo del eje longitudinal (mm)

Q = primer momento del área transformada a corto plazo del tablero de hormigón respecto del eje neutro de la sección compuesta a corto plazo (mm^3)

V_f = rango de fuerzas de corte vertical bajo la combinación de cargas para Estado Límite de Fatiga especificada en la Tabla 3.4.1-1, tomando la sobrecarga de fatiga como se especifica en el Artículo 3.6.1.4 (N)

Z_r = resistencia a la fatiga por corte de un conector de corte individual determinada como se especifica en el Artículo 6.10.10.2 (N)

La separación entre los centros de los conectores de corte en la dirección de la carga no deberá ser mayor que 600 mm ni menor que seis veces el diámetro del conector.

6.10.10.1.3 Separación transversal

Se deberán colocar conectores de corte transversalmente en el ala superior de la sección de acero. La separación entre dichos conectores de corte podrá ser constante o variable.

La separación entre centros de los conectores de corte tipo perno no deberá ser menor que 4.0 diámetros del perno medidos en forma transversal al eje longitudinal del elemento.

La distancia libre entre el borde del ala superior y el borde del conector de corte más próximo no deberá ser menor que 25 mm.

carga en estas posiciones se producen momentos positivos en porciones significativas de la longitud de la viga. En consecuencia, es razonable utilizar la totalidad de la sección compuesta, incluyendo el tablero de hormigón, para calcular el rango de corte a lo largo del tramo. Asimismo, en la mayoría de los casos en el análisis se considera que la fuerza de corte horizontal en el tablero es efectiva a lo largo de todo el tramo. A fin de satisfacer esta hipótesis la fuerza de corte en el tablero se debe desarrollar en la totalidad del tramo. Una opción permitida consiste en ignorar el tablero de hormigón al calcular el rango de corte en las regiones de flexión negativa, a menos que al calcular el rango de la tensión longitudinal se considere que el hormigón es efectivo en tracción, en cuyo caso se debe desarrollar la fuerza de corte en el tablero. Si en estas regiones se ignora el hormigón, no se podrá exceder la máxima separación especificada al final del presente Artículo.

6.10.10.1.4 Recubrimiento de hormigón y penetración

C6.10.10.1.4

La profundidad libre del recubrimiento de hormigón sobre la parte superior de los conectores de corte no debería ser menor que 50 mm. Los conectores de corte deberían penetrar como mínimo 50 mm en el tablero de hormigón.

6.10.10.2 Resistencia a la fatiga

La resistencia al corte para fatiga de un conector de corte tipo perno individual, Z_r , se deberá tomar como:

$$Z_r = \alpha d^2 \geq \frac{38.0d^2}{2} \quad (6.10.10.2-1)$$

donde:

$$\alpha = 238 - 29.5 \log N \quad (6.10.10.2-2)$$

y donde:

d = diámetro del perno (mm)

N = número de ciclos especificado en el Artículo 6.6.1.2.5

La separación en la dirección de la carga se deberá determinar a partir de la Ecuación 6.10.10.1.2-1 usando el valor de Z_r y el rango de fuerzas de corte V_{sr} .

Se deberá investigar el efecto del conector de corte sobre la resistencia a la fatiga del ala usando los requisitos del Artículo 6.6.1.2.

6.10.10.3 Requisitos especiales para puntos de contraflexión bajo carga permanente

En los elementos que en su condición final son no compuestos para flexión negativa, se deberán proveer conectores de corte adicionales en la región donde se encuentran los puntos de contraflexión bajo carga permanente.

El número de conectores de corte adicionales, n_{ac} , se deberá tomar como:

$$n_{ac} = \frac{A_s f_{sr}}{Z_r} \quad (6.10.10.3-1)$$

donde:

A_s = área total de armadura longitudinal sobre el apoyo interior dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón (mm²)

f_{sr} = rango de tensiones en la armadura longitudinal sobre

Los conectores de corte tipo perno deberían penetrar a través del enriñonado entre la parte inferior del tablero y el ala superior, si es que la hay, y hacia el interior del tablero. Caso contrario el enriñonado se debería reforzar de manera que contenga al conector de corte y desarrolle su carga en el tablero.

C6.10.10.2

El desarrollo de esta información se puede consultar en el trabajo de Slutter y Fisher (1966).

C6.10.10.3

El propósito de los conectores adicionales es desarrollar las barras de armadura usadas como parte de la sección compuesta para flexión negativa.

el apoyo interior bajo la combinación de cargas para Estado Límite de Fatiga especificada en el Artículo 3.4.1-1, tomando la sobrecarga de fatiga como se especifica en el Artículo 3.6.1.4 (MPa)

Z_r = resistencia a la fatiga por corte de un conector de corte individual determinada como se especifica en el Artículo 6.10.10.2 (N)

Los conectores de corte adicionales se deberán colocar en una distancia igual a un tercio del ancho efectivo del tablero de hormigón a ambos lados del punto de contraflexión bajo carga permanente. Los empalmes realizados en obra se deberían ubicar de manera que no interfieran con los conectores de corte.

6.10.10.4 Estado Límite de Resistencia

6.10.10.4.1 Disposiciones generales

La resistencia al corte mayorada de un único conector de corte, Q_r , en el Estado Límite de Resistencia se deberá tomar como:

$$Q_r = \phi_{sc} Q_n \quad (6.10.10.4.1-1)$$

donde:

Q_n = resistencia nominal al corte de un conector de corte individual determinada como se especifica en el Artículo 6.10.10.4.3 (N)

ϕ_{sc} = factor de resistencia para conectores de corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

En el Estado Límite de Resistencia el mínimo número de conectores de corte, n , sobre la región considerada se deberá tomar como:

$$n = \frac{P}{Q_r} \quad (6.10.10.4.1-2)$$

donde:

P = fuerza de corte nominal total determinada como se especifica en el Artículo 6.10.10.4.2 (N)

Q_r = resistencia al corte mayorada de un conector de corte determinada mediante la Ecuación 1 (N)

6.10.10.4.2 Fuerza de corte nominal

C6.10.10.4.2

Para los tramos simples y para los tramos compuestos

Las vigas compuestas en las cuales la separación

que en su condición final son no compuestos para flexión negativa, la fuerza de corte nominal total, P , entre el punto de máxima sobrecarga de diseño positiva más momento de impacto y cada punto de momento nulo adyacente se deberá tomar como:

$$P = P_p \quad (6.10.10.4.2-1)$$

donde:

P_p = fuerza de corte longitudinal total en el tablero de hormigón en el punto de máxima sobrecarga positiva más momento de impacto (N) tomada como el menor de los siguientes valores:

$$P_{1p} = 0.85 f'_c b_s t_s \quad (6.10.10.4.2-2)$$

o bien

$$P_{2p} = F_{yw} D t_w + F_{yt} b_{ft} t_{ft} + F_{yc} b_{fc} t_{fc} \quad (6.10.10.4.2-3)$$

donde:

b_s = ancho efectivo del tablero de hormigón (mm)

t_s = espesor del tablero de hormigón (mm)

Para los tramos continuos que en su condición final son compuestos para flexión negativa, la fuerza de corte nominal total, P , entre el punto de máxima sobrecarga de diseño positiva más momento de impacto y un extremo adyacente del elemento se deberá determinar usando la Ecuación 1. La fuerza de corte nominal total, P , entre el punto de máxima sobrecarga de diseño positiva más momento de impacto y el eje de un apoyo interior adyacente se deberá tomar como:

$$P = P_p + P_n \quad (6.10.10.4.2-4)$$

donde:

P_n = fuerza de corte longitudinal total en el tablero de hormigón sobre un apoyo interior (N) tomada como el menor de los siguientes valores:

$$P_{1n} = F_{yw} D t_w + F_{yt} b_{ft} t_{ft} + F_{yc} b_{fc} t_{fc} \quad (6.10.10.4.2-5)$$

o bien

$$P_{2n} = 0.45 f'_c b_s t_s \quad (6.10.10.4.2-6)$$

longitudinal de los conectores de corte varía dependiendo de la intensidad del corte tienen esencialmente la misma resistencia última y la misma cantidad de deflexión bajo cargas de servicio que otras vigas idénticas en las cuales los conectores están uniformemente espaciados. Sólo se requiere una ligera deformación en el hormigón para que los conectores más solicitados deban redistribuir el corte horizontal a los demás conectores menos solicitados. Lo importante a tener en cuenta es que el número total de conectores debe ser suficiente para desarrollar la fuerza de corte nominal, P_n , a ambos lados del punto de máxima sobrecarga de diseño más momento de impacto.

Se especifica el punto de máxima sobrecarga de diseño más momento de impacto debido a que se aplica a la sección compuesta y es más fácil de ubicar que un máximo de la sumatoria de los momentos que actúan en la sección compuesta.

Para los tramos continuos que en su condición final son compuestos para flexión negativa, se requieren suficientes conectores de corte para transferir la fuerza última de tracción en la armadura del tablero de hormigón a la sección de acero. El número de conectores de corte requeridos entre los puntos de máxima sobrecarga de diseño más momento de impacto y el eje de un apoyo interior adyacente se calcula a partir de la sumatoria de las fuerzas críticas en las ubicaciones de máximo momento positivo y negativo. Como no hay ningún punto donde el momento siempre cambie de signo, muchos conectores de corte resisten acción de inversión en el tablero de hormigón dependiendo de la posición de la sobrecarga. Sin embargo, el número de conectores de corte requerido se determina conservadoramente a partir de la sumatoria de las fuerzas críticas en las ubicaciones de máximo momento con el objetivo de proveer una resistencia al corte adecuada cualquiera sea la posición de la sobrecarga.

La fuerza de tracción en el tablero dada por la Ecuación 6 se define como 45 por ciento de la resistencia a la compresión especificada del hormigón a 28 días. Esta es una aproximación conservadora para considerar la contribución tanto de la armadura longitudinal como del hormigón que permanece efectivo en tracción en base a su módulo de rotura. También se puede utilizar un valor más preciso.

6.10.10.4.3 Resistencia nominal al corte

La resistencia nominal a corte de un conector de corte tipo perno embebido en un tablero de hormigón se deberá tomar como:

$$Q_n = 0.5A_{sc}\sqrt{f'_c E_c} \leq A_{sc}F_u \quad (6.10.10.4.3-1)$$

donde:

A_{sc} = área de la sección transversal de un conector de corte tipo perno (mm²)

E_c = módulo de elasticidad del hormigón del tablero determinado como se especifica en el Artículo 5.4.2.4 (MPa)

F_u = mínima resistencia al a tracción especificada de un conector de corte tipo perno determinada como se especifica en el Artículo 6.4.4 (MPa)

La resistencia nominal al corte de un conector de corte tipo canal embebido en un tablero de hormigón se deberá tomar como:

$$Q_n = 0.3(t_f + 0.5t_w)L_c\sqrt{f'_c E_c} \quad (6.10.10.4.3-2)$$

donde:

t_f = espesor del ala del conector de corte tipo canal (mm)

t_w = espesor del alma del conector de corte tipo canal (mm)

L_c = longitud de un conector de corte tipo canal (mm)

6.10.11 Rigidizadores

6.10.11.1 Rigidizadores transversales intermedios

6.10.11.1.1 Disposiciones generales

Los rigidizadores transversales deberán consistir en placas o perfiles soldados o abulonados a uno o ambos lados del alma.

Los rigidizadores que no se utilicen como placas de unión deberán apoyar firmemente en el ala de compresión, pero no es necesario que estén en contacto pleno con el ala de tracción.

Los rigidizadores que se utilicen como placas de unión para diafragmas o marcos transversales se deberán conectar a ambas alas mediante soldaduras o bulones. Para las almas

C6.10.10.4.3

Algunos estudios han definido la resistencia de los conectores de corte tipo perno como una función tanto del módulo de elasticidad del hormigón como de la resistencia del hormigón (*Ollgaard et al. 1971*). Observar que la resistencia al corte de los pernos está limitada por el producto entre el área de la sección transversal del perno y su resistencia última a la tracción. La Ecuación 2 es una forma modificada de la fórmula para determinar la resistencia de los conectores de corte tipo canal desarrollada por Slutter y Driscoll (1965) cuyo uso se extendió tanto al hormigón de agregados livianos como al hormigón de peso normal.

en las cuales:

$$\frac{D}{t_w} \leq 2.5 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}} \quad (6.10.11.1.1-1)$$

los rigidizadores que se utilicen como placas de unión solamente deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.11.1.2.

La distancia desde el extremo de una soldadura alma-rigidizador hasta el borde más próximo de la soldadura alma-ala o rigidizador longitudinal-alma adyacente no deberá ser menor que $4t_w$ ni mayor que $6t_w$.

6.10.11.1.2 Ancho saliente

El ancho, b_t , de cada elemento rigidizador saliente deberá satisfacer:

$$b_t \geq 50 + \frac{d}{30} \quad (6.10.11.1.2-1)$$

y

$$16t_p \geq b_t \geq b_f / 4 \quad (6.10.11.1.2-2)$$

donde:

b_f = ancho total del ala de compresión más ancha dentro de la sección considerada (mm)

d = profundidad total de la sección de acero (mm)

t_p = espesor de un elemento rigidizador saliente (mm)

El borde exterior de todos los rigidizadores transversales deberá estar a una distancia mayor o igual que 25 mm del borde exterior de cualquiera de las alas.

6.10.11.1.3 Momento de inercia

El momento de inercia de cualquier rigidizador transversal deberá satisfacer:

$$I_t \geq d_o t_w^3 J \quad (6.10.11.1.3-1)$$

donde:

J = relación requerida entre la rigidez de un rigidizador transversal y la de la placa de alma

C6.10.11.1.2

Los requisitos sobre ancho saliente mínimo de este artículo fueron tomados de Ketchum (1920).

En la Ecuación 2 para b_f se utiliza el ancho total del ala de compresión más ancha dentro de la sección considerada, para así asegurar un ancho mínimo del rigidizador que establezca el ala de compresión de mayor ancho contra su posible pandeo torsional. Este requisito también permite utilizar el mismo ancho mínimo del rigidizador en la totalidad de la sección, a menos que el borde exterior del rigidizador se prolongue hasta una distancia menor que 25 mm del borde superior del ala inferior y/o superior más angosta dentro de la sección.

C6.10.11.1.3

Para que el alma pueda desarrollar adecuadamente la resistencia al pandeo por corte, el rigidizador trasversal debe tener rigidez suficiente para mantener una verticalidad con deflexión lateral prácticamente nula en la totalidad de la línea del rigidizador. Para relaciones (d_o/D) menores que 1.0 se requieren valores de I_t mucho mayores, tal como se discute en el trabajo de Timoshenko y Gere (1961) y como se representa mediante la Ecuación 1. En el caso de rigidizadores simples, se asume implícitamente que una parte significativa del alma contribuye a la rigidez flexional de manera tal que el eje neutro del rigidizador se encuentra próximo al borde en contacto con el alma. Por lo tanto, por

$$= 2.5 \left(\frac{D}{d_o} \right)^2 - 2.0 \geq 0.5 \quad (6.10.11.1.3-2)$$

donde:

d_o = separación entre rigidizadores transversales (mm)

I_t = momento de inercia del rigidizador transversal respecto del borde en contacto con el alma en el caso de rigidizadores simples y respecto de la mitad del espesor del alma en el caso de pares de rigidizadores (mm⁴)

Los rigidizadores transversales utilizados en paneles de alma con rigidizadores transversales también deberán satisfacer:

$$I_t \geq \left(\frac{b_t}{b_\ell} \right) \left(\frac{D}{3.0d_o} \right) I_\ell \quad (6.10.11.1.3-3)$$

donde:

b_ℓ = ancho saliente del rigidizador longitudinal (mm)

b_t = ancho saliente del rigidizador transversal (mm)

I_ℓ = momento de inercia del rigidizador longitudinal determinado como se especifica en el Artículo 6.10.11.3.3 (mm⁴)

6.10.11.1.4 Área

Los rigidizadores transversales intermedios que deban soportar las fuerzas impuestas por la acción del campo de tensiones del alma tal como se especifica en el Artículo 6.10.9.3 deberán satisfacer:

$$A_s \geq \left[0.15B \frac{D}{t_w} (1-C) \left(\frac{V_u}{\phi_v V_n} \right) - 18 \right] \frac{F_{yw}}{F_{crs}} t_w^2 \quad (6.10.11.1.4-1)$$

donde:

F_{crs} = tensión de pandeo local elástico para el rigidizador (MPa)

$$= \frac{0.31E}{\left(\frac{b_t}{t_p} \right)^2} \leq F_{ys} \quad (6.10.11.1.4-2)$$

motivos de simplicidad, se asume que el eje neutro está ubicado en este borde y se desprecia la contribución del alma al momento de inercia respecto de este eje.

Las cargas laterales a lo largo de un rigidizador longitudinal se transfieren a los rigidizadores transversales adyacentes en forma de reacciones concentradas (*Cooper 1967*). La Ecuación 3 da una relación entre los momentos de inercia de los rigidizadores longitudinales y transversales para asegurar que estos últimos no fallen bajo las reacciones concentradas. Esta ecuación se aplica ya sea que los rigidizadores se encuentren del mismo lado del alma o de lados opuestos.

C6.10.11.1.4

Los rigidizadores transversales deben tener área suficiente para resistir la componente vertical del campo de tensiones y también para no estar sujetos al pandeo local. La Ecuación 1 combina la resistencia al pandeo local de un rigidizador transversal con el área requerida. La Ecuación 1 se deriva igualando la resistencia al pandeo local del rigidizador a la componente vertical del campo de tensiones. La Ecuación 2 da la resistencia al pandeo local del rigidizador, F_{crs} . En algunos casos la Ecuación 1 puede dar un resultado negativo. En estos casos el área requerida es nula. Un resultado negativo indica que el rigidizador por sí solo es suficiente para resistir el campo de tensiones. Entonces el rigidizador solamente debe ser dimensionado para rigidez de acuerdo con el Artículo 6.10.11.1.3 y satisfacer los requisitos sobre ancho saliente del Artículo 6.10.11.1.2.

No es necesario investigar este requisito para los paneles de alma que no deban desarrollar un campo de tracciones.

donde:

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

A_s = área del rigidizador; área total de ambos rigidizadores en el caso de los rigidizadores utilizados de a pares (mm^2)

B = 1.0 para pares de rigidizadores

= 1.8 para rigidizadores simples

= 2.4 para rigidizadores de placa simple

C = relación entre la resistencia al pandeo por corte y la resistencia a la fluencia por corte determinada mediante las Ecuaciones 6.10.9.3.2-4, 6.10.9.3.2-5 o 6.10.9.3.2-6, según corresponda

F_{ys} = mínima resistencia a la fluencia especificada del rigidizador (MPa)

V_n = resistencia nominal al corte determinada como se especifica en los Artículos 6.10.9.2 y 6.10.9.3 para almas no rigidizadas y rigidizadas, respectivamente (N)

V_u = corte debido a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia (N)

6.10.11.2 Rigidizadores de apoyo

6.10.11.2.1 Disposiciones generales

Se deberán colocar rigidizadores de apoyo en las almas de las secciones armadas en todas las ubicaciones de apoyo. En las ubicaciones de apoyo de los perfiles laminados y en otras ubicaciones de una sección armada o un perfil laminado sujetas a cargas concentradas, cuando las cargas no sean transmitidas a través de un tablero o sistema de tablero, se deberán colocar rigidizadores de apoyo o bien el alma deberá satisfacer los requisitos del Artículo D6.5.

Los rigidizadores de apoyo deberán consistir en una o más placas o perfiles soldados o abulonados a ambos lados del alma. Las uniones al alma se deberán diseñar de manera que transmitan la totalidad de la fuerza de aplastamiento debida a las cargas mayoradas.

Los rigidizadores deberán abarcar la totalidad de la profundidad del alma y prolongarse hasta tan cerca como sea posible de los bordes exteriores de las alas.

Cada rigidizador se deberá cepillar de manera que apoye contra el ala a través de la cual recibe su carga o bien se

C6.10.11.2.1

Las almas de las secciones armadas y los perfiles laminados sin rigidizadores de apoyo en las ubicaciones indicadas se deben investigar para los estados límites de fluencia local del alma y abolladura del alma de acuerdo con los procedimientos especificados en el Artículo D6.5. Estas secciones se deberían modificar de manera que cumplan con estos requisitos, caso contrario en las ubicaciones consideradas se deberían colocar rigidizadores de apoyo diseñados de acuerdo con estas Especificaciones.

En particular, la inadecuada capacidad de resistir cargas concentradas temporarias que no se transmiten a través del tablero o del sistema de tablero podría provocar una falla durante la construcción. El Ingeniero debería tener en cuenta este tema muy especialmente cuando las vigas se lancen sobre los apoyos de manera incremental.

deberá fijar a dicha ala mediante una soldadura en ranura de penetración total.

6.10.11.2.2 Ancho saliente

El ancho, b_t , de cada elemento rigidizador saliente deberá satisfacer:

$$b_t \leq 0.48t_p \sqrt{\frac{E}{F_{yt}}} \quad (6.10.11.2.2-1)$$

donde:

F_{yt} = mínima resistencia a la fluencia especificada del rigidizador (MPa)

t_p = espesor del elemento rigidizador saliente (mm)

6.10.11.2.3 Resistencia al aplastamiento

La resistencia al aplastamiento mayorada para los extremos recortados de los rigidizadores de apoyo se deberá tomar como:

$$(R_{sb})_r = \phi_b (R_{sb})_n \quad (6.10.11.2.3-1)$$

donde:

$(R_{sb})_n$ = resistencia nominal al aplastamiento para los extremos recortado de los rigidizadores de apoyo (N)

$$= 1.4A_{pn}F_{ys} \quad (6.10.11.2.3-2)$$

donde:

ϕ_b = factor de resistencia para aplastamiento especificado en el Artículo 6.5.4.2

A_{pn} = área de los elementos de un rigidizador que sobresalen más allá de las soldaduras de filete entre el alma y un ala pero no más allá del borde del ala (mm^2)

F_{ys} = mínima resistencia a la fluencia especificada del rigidizador (MPa)

6.10.11.2.4 Resistencia axial de los rigidizadores de apoyo

6.10.11.2.4a Disposiciones generales

La resistencia axial mayorada, P_r , se deberá determinar

C6.10.11.2.2

La intención de los requisitos especificados en el presente artículo es evitar el pandeo local de las placas utilizadas en los rigidizadores de apoyo.

C6.10.11.2.3

Para que las placas utilizadas en los rigidizadores de apoyo estén en contacto firme contra las alas, es necesario recortar parte del rigidizador para despejar la soldadura de filete entre el alma y el ala. Es por esto que el área que soporta aplastamiento directo es menor que el área bruta del rigidizador. La resistencia al aplastamiento se basa en esta área de apoyo y en la resistencia a la fluencia del rigidizador.

La resistencia al aplastamiento mayorada especificada es aproximadamente equivalente a la resistencia al aplastamiento indicada en AISC (1999). La resistencia nominal al aplastamiento dada por la Ecuación 2 está reducida respecto de la resistencia nominal al aplastamiento de $1.8A_{pn}F_{ys}$ especificada en AISC (1999) de manera de reflejar la diferencia relativa entre los factores de resistencia para aplastamiento dados en las Especificaciones para LRFD de AISC y AASHTO.

C6.10.11.2.4a

La restricción del extremo contra el pandeo de columna

como se especifica en el Artículo 6.9.2.1 usando la mínima resistencia a la fluencia especificada de las placas rigidizadoras, F_{ys} . El radio de giro se deberá calcular respecto de la mitad del espesor del alma y la longitud efectiva se deberá tomar igual a $0.75D$, siendo D la profundidad del alma.

6.10.11.2.4b Sección efectiva

Para los rigidizadores abulonados al alma, la sección de columna efectiva deberá consistir exclusivamente en los elementos rigidizadores.

Excepto que aquí se especifique lo contrario, para los rigidizadores soldados al alma se deberá incluir una parte del alma como parte de la sección de columna efectiva. Para los rigidizadores que consisten en dos placas soldadas al alma, las secciones de columna efectivas deberán consistir en los dos elementos rigidizadores, más una franja central del alma que se extienda no más de $9t_w$ a cada lado de los rigidizadores. Si se utiliza más de un par de rigidizadores, la sección de columna efectiva deberá consistir en todos los elementos rigidizadores, más una franja central del alma que se extienda no más de $9t_w$ a cada lado de los elementos exteriores del grupo.

No se deberá incluir la franja del alma en la sección efectiva en el caso de los apoyos interiores de los tramos continuos de los elementos híbridos en los cuales la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma es menor que 70 por ciento de la resistencia mínima a la fluencia especificada del ala de mayor resistencia.

Si la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma es menor que la de las placas rigidizadoras, la franja del alma incluida en la sección efectiva se deberá reducir multiplicando por la relación F_{yw}/F_{ys} .

6.10.11.3 Rigidizadores longitudinales

6.10.11.3.1 Disposiciones generales

Cuando sean requeridos, los rigidizadores longitudinales deberían consistir ya sea en una placa soldada a un lado del alma o bien en un perfil abulonado. Los rigidizadores longitudinales deberán estar ubicados en una posición vertical sobre el alma tal que se satisfagan la Ecuación 6.10.3.2.1-3 para construibilidad, la Ecuación 6.10.4.2.2-4 en Estado Límite de Servicio, y todos los requisitos de diseño aplicables en Estado Límite de Resistencia.

La tensión de flexión en el rigidizador longitudinal, f_s , debida a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia y al verificar la construibilidad deberá satisfacer:

$$f_s \leq \phi_f R_h F_{ys} \quad (6.10.11.3.1-1)$$

provista por las alas permite utilizar una longitud efectiva reducida. Al calcular la resistencia axial se utiliza la mínima resistencia a la fluencia especificada de las placas rigidizadoras, F_{ys} , para tomar en cuenta la fluencia temprana de las placas rigidizadoras de menor resistencia.

C6.10.11.2.4b

Se asume que una parte del alma actúa juntamente con las placas que forman el rigidizador de apoyo. Esta parte del alma no se incluye en el caso de los apoyos interiores de los elementos híbridos continuos debido a la cantidad de fluencia del alma que se anticipa ocurrirá a causa de la tensión de flexión longitudinal que actúa en este caso particular. En los apoyos finales de los elementos híbridos se puede incluir el alma, independientemente de la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma.

Para los raros casos en los cuales F_{ys} es mayor que F_{yw} , la resistencia axial del rigidizador toma en cuenta la fluencia del alma de menor resistencia modificando el ancho de la franja de alma incluida en la sección efectiva aplicando el factor F_{yw}/F_{ys} .

C6.10.11.3.1

Para las secciones compuestas en regiones de flexión positiva, la profundidad del alma en compresión D_c cambia con relación a la posición vertical de un rigidizador de alma longitudinal, que generalmente se encuentra a una distancia fija del ala de compresión, una vez que se ha colocado el tablero de hormigón. Por lo tanto, la resistencia al pandeo flexional del alma calculada es diferente antes y después de colocar el tablero y además depende de la carga. En consecuencia, es posible que sea necesario investigar diferentes ubicaciones del rigidizador a fin de determinar la ubicación del rigidizador que satisfagan la Ecuación 6.10.3.2.1-3 para construibilidad, la Ecuación 6.10.4.2.2-4 en Estado Límite de Servicio, y los requisitos de diseño aplicables en Estado Límite de Resistencia a lo largo de la

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

F_{ys} = mínima resistencia a la fluencia especificada del rigidizador (MPa)

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

viga. Para determinar una ubicación de prueba inicial para el rigidizador en las regiones de flexión positiva se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\frac{d_s}{D_c} = \frac{1}{1 + 1.5 \sqrt{\frac{f_{DC1} + f_{DC2} + f_{DW} + f_{LL+IM}}{f_{DC1}}}} \quad (C6.10.11.3.1-1)$$

donde:

d_s = distancia desde el eje de un rigidizador longitudinal tipo placa, o desde la línea de sujetadores perpendicular a la dirección de la carga de un rigidizador longitudinal tipo perfil, hasta la superficie interior o rama del ala comprimida (mm)

D_c = profundidad del alma de la sección de acero no compuesta solicitada a compresión en el rango elástico (mm)

f_{xx} = tensiones en el ala comprimida en el Estado Límite de Resistencia provocadas por las diferentes cargas mayoradas en la sección con la máxima tensión de compresión. $DC1$, carga permanente que actúa en la sección no compuesta; $DC2$, carga permanente que actúa en la sección compuesta a largo plazo; DW , carga correspondiente a la superficie de rodamiento; y $LL+IM$; actuando sobre sus respectivas secciones (MPa). En este cálculo se debe despreciar la flexión lateral de las alas.

Para satisfacer todos los criterios especificados para los diferentes estados límites puede que sea necesario mover el rigidizador hacia arriba o hacia abajo.

Para las secciones compuestas en regiones de flexión negativa y para las secciones no compuestas se sugiere analizar una ubicación de prueba inicial para el rigidizador a $2D_c/5$ de la superficie interna del ala de compresión en la sección con la máxima tensión de compresión por flexión debida a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia. Asimismo, para las secciones compuestas D_c se debería calcular para la sección formada por la viga de acero más la armadura longitudinal del tablero. Para satisfacer todos los criterios especificados puede que sea necesario mover el rigidizador hacia arriba o hacia abajo, en particular en aquellos casos en los cuales se asume que el tablero de hormigón es efectivo para soportar tracción en las regiones de flexión negativa en Estado Límite de Servicio, tal como se permite para las secciones compuestas que satisfacen los requisitos especificados en el Artículo

6.10.4.2.1.

Estudios teóricos y experimentales realizados sobre vigas no compuestas indican que la ubicación óptima de un rigidizador longitudinal es $2D_c/5$ para flexión y $D/2$ para corte. Ensayos realizados también indican que en estas secciones los rigidizadores ubicados a $2D_c/5$ son efectivos para controlar las deflexiones laterales del alma bajo flexión (*Cooper 1967*). Se recomienda usar la distancia $2D_c/5$ debido a que el corte siempre es acompañado por momento y debido a que un rigidizador longitudinal correctamente dimensionado también reduce las deflexiones laterales del alma provocadas por el corte. Además, debido a que D_c puede variar a lo largo del tramo, se recomienda que el rigidizador se ubique en base al valor de D_c calculado en la sección con la mayor tensión de compresión por flexión. De este modo es posible que el rigidizador no esté ubicado en su posición óptima en otras secciones con menor tensión y un valor de D_c diferente. Estas secciones también se deberían analizar para verificar que satisfagan los estados límites especificados.

En las regiones en las cuales el alma está sujeta a inversión de tensiones puede ser necesario, o deseable, utilizar dos rigidizadores longitudinales en el alma.

Se prefiere que los rigidizadores longitudinales estén ubicados del lado del alma opuesto a aquél donde se encuentran los rigidizadores transversales intermedios. Caso contrario, en los rigidizadores de apoyo y placas de unión en los cuales el rigidizador longitudinal y el elemento transversal del alma se deban intersectar, el Ingeniero puede optar por interrumpir ya sea el rigidizador longitudinal o el elemento transversal. Sin embargo, el elemento interrumpido se debería unir a ambos lados del elemento continuo mediante uniones suficientes para desarrollar la resistencia a la flexión y la resistencia axial del elemento interrumpido. En este caso se prefiere que los rigidizadores longitudinales se hagan continuos. En caso que el rigidizador longitudinal se interrumpa y no se una al elemento transversal del alma, su área no se debería considerar al calcular las propiedades de la sección. Todas las interrupciones se deben diseñar a fatiga. Schilling (1986) describe diferentes rigidizadores y detalles junto con las correspondientes categorías para diseño a fatiga. Para evitar la intersección de soldaduras siempre se deberían realizar recortes o rebajes.

Los rigidizadores longitudinales están sujetos a las mismas deformaciones por flexión que el alma. Por lo tanto, deben tener rigidez y resistencia suficientes para resistir el pandeo flexional del alma, cuando sea necesario, y para transmitir las tensiones en el rigidizador y una parte del alma como si se tratara de una columna equivalente (*Cooper 1967*). Por lo tanto, no se permite la fluencia nominal total de los rigidizadores en Estado Límite de Resistencia, lo que constituye un límite superior. La

Ecuación 1 limita la validez de la Ecuación 6.10.11.3.3-2, la cual a su vez se basa en la resistencia axial de una sección de columna equivalente formada por el rigidizador y una parte de la placa del alma. Para tomar en cuenta la influencia de la fluencia del alma sobre la tensión en el rigidizador longitudinal en el Estado Límite de Resistencia en los elementos híbridos, en la Ecuación 1 la tensión calculada elásticamente en el rigidizador se limita a $\phi_f R_h F_{ys}$. En la Ecuación 1 se recomienda utilizar el valor de R_h que se aplica a las alas en el Estado Límite de Resistencia en la sección considerada.

6.10.11.3.2 Ancho saliente

El ancho saliente, b_ℓ , del rigidizador deberá satisfacer:

$$b_\ell \leq 0.48 t_s \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \quad (6.10.11.3.2-1)$$

donde:

t_s = espesor del rigidizador (mm)

6.10.11.3.3 Momento de inercia y radio de giro

Los rigidizadores longitudinales deberán satisfacer:

$$I_\ell \geq D t_w^3 \left[2.4 \left(\frac{d_o}{D} \right)^2 - 0.13 \right] \quad (6.10.11.3.3-1)$$

y

$$r \geq \frac{0.16 d_o \sqrt{\frac{F_{ys}}{E}}}{\sqrt{1 - 0.6 \frac{F_{yc}}{R_h F_{ys}}}} \quad (6.10.11.3.3-2)$$

donde:

d_o = separación de los rigidizadores transversales (mm)

I_ℓ = momento de inercia del rigidizador longitudinal, incluyendo un ancho de alma efectivo igual a $18 t_w$ tomado respecto del eje neutro de la sección combinada (mm^4). Si F_{yw} es menor que F_{ys} , la franja de alma incluida en la sección efectiva se deberá reducir multiplicando por la relación F_{yw}/F_{ys} .

r = radio de giro del rigidizador longitudinal, incluyendo un ancho de alma efectivo igual a $18 t_w$ tomado

C6.10.11.3.2

La intención de este requisito es evitar el pandeo local del rigidizador longitudinal.

C6.10.11.3.3

La Ecuación 1 asegura que el rigidizador tendrá rigidez suficiente para mantener una línea horizontal con deflexión lateral prácticamente nula en el panel de alma cuando sea necesario resistir pandeo flexional del alma (*Galambos 1998*). La Ecuación 2 asegura que el rigidizador longitudinal actuando en combinación con una franja del alma adyacente soportará la tensión de compresión axial sin pandeo lateral. El momento de inercia, I_ℓ , y el radio de giro, r , se toman respecto del eje neutro de la sección transversal de una columna equivalente formada por el rigidizador y un ancho del alma adyacente, tal como lo sugirió Cooper (*1967*). Las Especificaciones anteriores requerían que estas magnitudes se calcularan respecto del borde del rigidizador en contacto con la placa de alma. Los valores de I_ℓ y r calculados de acuerdo con la sugerencia de Cooper (*1967*) son generalmente menores que los correspondientes valores determinados de acuerdo con las Especificaciones anteriores. El procedimiento especificado para el cálculo de I_ℓ y r es consistente con los requisitos de AASHTO (*2003*) para vigas doble T horizontalmente curvas en el límite en el cual la viga es recta. El efecto de que la placa del alma tenga menor resistencia a la fluencia que el rigidizador longitudinal se considera modificando la franja de alma que contribuye a la sección de columna efectiva mediante el factor F_{yw}/F_{ys} .

La Ecuación 2 se basa en el modelo descrito por Cooper

respecto del eje neutro de la sección combinada (mm). Si F_{yw} es menor que F_{ys} , la franja de alma incluida en la sección efectiva se deberá reducir multiplicando por la relación F_{yw}/F_{ys} .

(1967), excepto que además considera la posibilidad de que las mínimas resistencias a la fluencia especificadas para el rigidizador y el ala de compresión sean diferentes. Además, se aproxima la influencia de un alma híbrida incluyendo en esta ecuación el factor de hibridez, R_h . Para una sección doble Te no híbrida, el radio de giro requerido determinado mediante la Ecuación 2 es ligeramente mayor que el que requerían las Especificaciones anteriores. Para una sección doble Te en la cual F_{yw}/F_{ys} es mayor que la unidad, el radio de giro requerido determinado mediante la Ecuación 2 es significativamente mayor que el que requerían las Especificaciones anteriores. Esto es necesario porque en estos casos el rigidizador longitudinal está sujeto a tensiones más elevadas en comparación con su resistencia como una columna equivalente que en una sección homogénea equivalente.

El Artículo 6.10.9.3.1 requiere que la resistencia al corte del panel del alma se determine en base a la profundidad total del alma, D . Por este motivo no se especifica ningún requisito respecto del anclaje del campo de tensiones en los rigidizadores longitudinales.

6.10.12 Cubrejuntas

6.10.12.1 Disposiciones generales

La longitud de cualquier cubrejuntas, L_{cp} , en mm, que se añade a un elemento deberá satisfacer:

$$L_{cp} \geq 2d + 900 \quad (6.10.12.1-1)$$

donde:

d = profundidad total de la sección de acero (mm)

No se deberán usar cubrejuntas unidos mediante soldaduras de longitud parcial en las alas de más de 20 mm de espesor para estructuras con recorridos de cargas no redundantes sujetas a cargas repetitivas que producen tracción o inversión de tensiones en el ala.

El máximo espesor de un único cubrejuntas no deberá ser mayor que dos veces el espesor del ala a la cual el cubrejuntas está unido. No estará permitido utilizar múltiples cubrejuntas soldados.

Los cubrejuntas podrán ser de ancho mayor o menor que el ala a la cual están unidos.

6.10.12.2 Requisitos aplicables a los extremos de los cubrejuntas

6.10.12.2.1 Disposiciones generales

El extremo teórico del cubrejuntas se deberá tomar como

la sección en la cual el momento, M_u , o la tensión de flexión, f_{bu} , debido a las cargas mayoradas es igual a la resistencia a la flexión mayorada del ala. El cubrejuntas se deberá prolongar más allá del extremo teórico una distancia suficiente para que:

- El rango de tensiones en el extremo real satisfaga los requisitos de fatiga correspondientes especificados en el Artículo 6.6.1.2, y
- La fuerza longitudinal en el cubrejuntas debida a las cargas mayoradas en el extremo teórico se pueda desarrollar mediante soldaduras y/o bulones colocados entre los extremos teórico y real.

El ancho en los extremos de los cubrejuntas de sección uniformemente variable no deberá ser menor que 75 mm.

6.10.12.2.2 Extremos soldados

Las soldaduras que conecten el cubrejuntas al ala entre los extremos teórico y real deberán ser adecuadas para desarrollar la fuerza calculada en el cubrejuntas en el extremo teórico.

Si los cubrejuntas tienen mayor ancho que el ala, las soldaduras no se deberán envolver alrededor de los extremos del cubrejuntas.

6.10.12.2.3 Extremos abulonados

Los bulones en las uniones por fricción entre el cubrejuntas y el ala que están ubicados entre los extremos teórico y real deberán ser adecuados para desarrollar la fuerza debida a las cargas mayoradas en el cubrejuntas en el extremo teórico.

La resistencia al deslizamiento de las uniones abulonadas en los extremos se deberá determinar de acuerdo con el Artículo 6.13.2.8. Las soldaduras longitudinales que conectan el cubrejuntas al ala deberán ser continuas y se deberán interrumpir a una distancia igual a una separación entre bulones de la primera fila de bulones en la parte abulonada en los extremos. Cuando se utilicen cubrejuntas abulonados en los extremos, la documentación técnica deberá especificar que se instalen siguiendo la siguiente secuencia:

- Perforar los orificios,
- Limpiar las superficies de contacto,
- Instalar los bulones, y
- Soldar las placas.

C6.10.12.2.3

Wattar et al. (1985) discuten diferentes investigaciones que se han realizado sobre cubrejuntas abulonados en sus extremos.

6.11 ELEMENTOS DE SECCIÓN TIPO CAJÓN SOLICITADOS A FLEXIÓN

6.11.1 Disposiciones generales

Los requisitos de este artículo se aplican para la flexión de las secciones cerradas rectas tipo cajón u omega invertida individual o múltiple que son simétricas respecto del eje vertical en el plano del alma y que se utilizan en puentes simples o continuos cuyos tramos tienen una longitud moderada. Los requisitos abarcan el diseño de elementos compuestos, híbridos y no híbridos, y de profundidad de alma constante y variable tal como se definen en el Artículo 6.10.1.1, los Artículos 6.10.1.3 a 6.10.1.8 y los Artículos 6.11.1.1 a 6.11.1.4 y con sujeción a los requisitos establecidos en dichos artículos. Los requisitos del Artículo 6.10.1.6 se deberán aplicar solamente a las alas superiores de las secciones tipo omega invertida.

Las secciones tipo cajón simple se deberán ubicar en una posición central con respecto a la sección transversal, y el centro de gravedad de la carga permanente deberá estar tan cerca del centro de corte del cajón como sea posible. Estos requisitos no se deberán aplicar a las secciones tipo cajón simple de múltiples celdas, ni a las alas de las secciones tipo cajón compuestas que se utilizan como alas inferiores.

Todos los tipos elementos de sección tipo cajón solicitados a flexión se deberán diseñar de manera que como mínimo satisfagan:

- Los límites aplicables a las dimensiones de la sección transversal especificados en el Artículo 6.11.2;
- Los requisitos sobre construibilidad especificados en el Artículo 6.11.3;
- Los requisitos sobre Estado Límite de Servicio especificados en el Artículo 6.11.4;
- Los requisitos sobre Estado Límite de Fatiga y Fractura especificados en el Artículo 6.11.5;
- Los requisitos sobre Estado Límite de Resistencia especificados en el Artículo 6.11.6.

En los elementos de alma esbelta la resistencia al pandeo flexional del alma se deberá determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.9. Los factores de reducción de la resistencia para las alas de los elementos de alma esbelta y/o de los elementos híbridos se deberán determinar como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.

Los marcos transversales y diafragmas internos y externos para las secciones tipo cajón deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.7.4. El arriostramiento de las alas superiores de las secciones tipo omega invertida deberá satisfacer los requisitos del Artículo 6.7.5.

C6.11.1

El Artículo 6.11.1 se ocupa de temas generales que se aplican a todos los tipos de secciones tipo cajón cerrado y omega invertida que trabajan a flexión. De acuerdo con el uso que se le da en la presente, el término “longitud moderada” se refiere a puentes de tramos de hasta aproximadamente 105 000 mm. Los requisitos se pueden aplicar a tramos de mayor longitud siempre que sea en base a una evaluación exhaustiva de la aplicación del puente, consistente con los fundamentos básicos de la ingeniería estructural. La FHWA (1980) ha publicado información adicional sobre el diseño de puentes de vigas cajón de acero con grandes longitudes de tramo. En Wolchuk (1990) el lector encontrará un panorama general sobre los puentes de vigas cajón.

Los cinco puntos listados en este artículo indican la forma de organización dominante que se les ha dado a los requisitos para el diseño de los elementos de sección tipo cajón solicitados a flexión. Para evitar repeticiones, algunos de los temas generales del presente artículo hacen referencia a los requisitos generales del Artículo 6.10.1 para secciones doble Te que también se aplican a las secciones tipo cajón. Cuando es necesario, el Artículo 6.11 hace referencia a otros apartados del Artículo 6.10.

De acuerdo con el uso que se le da en los presentes requisitos, el término “ala de una sección tipo cajón” se refiere a una placa de ala que está conectada a dos almas.

Estos requisitos no se aplican a las secciones tipo cajón no compuestas, tal como se definen en el Artículo 6.10.1.2, que se utilizan trabajando a flexión. De acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.1.5, en el análisis para cargas aplicadas a secciones compuestas se debe asumir que el tablero de hormigón es efectivo sobre la totalidad de la longitud del tramo. Por lo tanto, en todos los tipos de secciones compuestas tipo cajón, para evitar la posible desadherencia del tablero es necesario que haya conectores de corte en la totalidad del tramo que permitan resistir el corte torsional que existe a lo largo del tramo. También debe haber conectores de corte en las regiones de flexión negativa por motivos de consistencia con el prototipo y los puentes modelo que se estudiaron cuando se desarrollaron originalmente los requisitos sobre distribución de la sobrecarga viva en las secciones tipo cajón (Johnson y Mattock 1967). La resistencia a la flexión de las secciones no compuestas tipo cajón cerrado que se utilizan como elementos comprimidos o traccionados se especifica en el Artículo 6.12.2.2.2.

Estos requisitos se pueden aplicar a las secciones compuestas tipo cajón cerrado, o a las secciones cuya ala

superior es una placa de acero compuesta con el tablero de hormigón, que se utilizan como elementos trabajando a flexión. Hasta el momento, debido a consideraciones económicas relacionadas con la implementación de los requisitos de seguridad necesarios para trabajar dentro de los cajones cerrados, el uso de estas secciones en Estados Unidos ha sido limitado. Estas Especificaciones no se aplican al uso de hormigón compuesto sobre las alas inferiores de las secciones tipo cajón para rigidizar las alas en las regiones de flexión negativa.

Estas Especificaciones permiten utilizar secciones tipo cajón simple porque se puede establecer equilibrio torsional usando algunos apoyos dobles. En las secciones tipo cajón simple, ubicar el centro de gravedad de la carga permanente cerca del centro de corte asegura que la torsión sea mínima. En este tipo de secciones ciertos elementos tales como las barreras sonoras que se colocan a un solo lado del puente pueden resultar críticos.

Estas Especificaciones no se aplican a las secciones tipo cajón simple de múltiples celdas debido a que la información publicada en Estados Unidos sobre este tipo de elementos es muy limitada. El análisis de este tipo de puentes implica considerar los flujos de corte en cada una de las celdas.

Para simplificar su análisis y fabricación, en los elementos tipo cajón de profundidad de alma variable y almas inclinadas preferentemente la inclinación de las almas debería ser constante. Para que haya una distancia constante entre las almas en la parte superior del cajón, algo que también se prefiere, es necesario que el ancho del ala inferior varíe con la longitud y que las alturas de las almas en una sección transversal dada se mantengan iguales. Si el puente se ha de lanzar de manera incremental se recomienda utilizar cajones de profundidad constante.

Los requisitos del Artículo 6.11 proporcionan un enfoque unificado para considerar la combinación de flexión respecto del eje mayor y flexión lateral de las alas, cualquiera sea su origen, en el diseño de las alas superiores de las secciones tipo omega invertida durante su construcción. Estos requisitos también proporcionan un enfoque unificado para considerar la combinación de tensión normal y tensión de corte por torsión de Saint-Venant en secciones tipo cajón cerrado y omega invertida tanto durante su construcción como en su condición final. Se proporcionan ecuaciones de diseño generales para determinar la resistencia nominal a la flexión de las alas de las secciones tipo cajón bajo los efectos combinados de tensión normal y tensión de corte torsional. Los requisitos también permiten considerar el corte torsional en el diseño de las almas y los conectores de corte de las secciones tipo cajón. En el caso de los cajones rectos, a menos que el puente esté sujeto a pares torsores importantes, típicamente los efectos del corte torsional son relativamente pequeños.

Por ejemplo, los cajones que apoyan sobre apoyos oblicuos generalmente están sujetos a pares torsores importantes.

Para aquellos casos en los cuales se estima que los efectos de la flexión lateral y/o el corte torsional de las alas son insignificantes o incidentales, o bien cuando estos efectos no se han de considerar, en las ecuaciones correspondientes los términos relacionados con estos efectos simplemente se igualan a cero. En este caso el formato de las ecuaciones se reduce al mismo formato que tienen las ecuaciones más familiares que incluían las Especificaciones anteriores para verificar la resistencia nominal a la flexión de las secciones tipo cajón en ausencia de flexión lateral de las alas y de torsión de Saint-Venant.

Los cálculos fundamentales para los elementos flexionales, anteriormente incluidos en el Artículo 6.10.3 de AASHTO (1998), se han trasladado al Apéndice D.

6.11.1.1 Determinación de las tensiones

Las alas de las secciones tipo cajón simple y múltiple se deberán considerar totalmente efectivas para resistir flexión si el ancho del ala no es mayor que un quinto de la longitud de tramo efectiva. En el caso de los tramos simples, la longitud de tramo efectiva se deberá tomar igual a la longitud del tramo. En el caso de los tramos continuos, la longitud de tramo efectiva se deberá tomar igual a la distancia entre puntos de contraflexión bajo carga permanente, o entre un apoyo simple y un punto de contraflexión bajo carga permanente, según corresponda. Si el ancho del ala es mayor que un quinto de la longitud de tramo efectiva, se deberá considerar que solamente un ancho igual a un quinto de la longitud de tramo efectiva es efectivo para resistir flexión.

Para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3, el momento flexional debido a la sobrecarga viva en cada cajón se puede determinar de acuerdo con los requisitos del Artículo 4.6.2.2.2b. El corte debido a la torsión de Saint-Venant y las tensiones de flexión transversal y alabeo longitudinal debidas a la distorsión de la sección transversal también se pueden despreciar para las secciones de estos puentes que tengan alas totalmente efectivas. La sección de un elemento exterior que se supone resiste cargas de viento horizontales mayoradas en estos puentes se puede tomar como el ala inferior del cajón actuando como un alma y 12 veces el espesor del alma actuando como alas.

Para las secciones tipo cajón simple, y para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3, no se deberán aplicar los requisitos del Artículo 4.6.2.2.2b. Para estas secciones, y para las secciones tipo cajón que no tienen alas totalmente efectivas, se deberán considerar los efectos tanto del corte flexional como del corte por torsión de Saint-Venant. En las

C6.11.1.1

Se realizaron análisis de tensiones en base a diseños reales de puentes de vigas para evaluar el ancho efectivo del ala de una sección tipo cajón usando una serie de ecuaciones para placas plegadas (*Goldberg y Leve 1957*). El estudio incluyó puentes en los cuales las relaciones entre la longitud de tramo y el ancho de ala estaban comprendidas entre 5.65 y 35.3. Los anchos de ala efectivos como proporción del ancho de ala total utilizados abarcaron un rango de 0.89 (puente con la menor relación entre longitud de tramo y ancho de ala) a 0.99 (puente con la mayor relación entre longitud de tramo y ancho de ala). Estos datos sugieren que es razonable permitir que un ala de una sección tipo cajón sea considerada totalmente efectiva y sujeta a una tensión longitudinal uniforme, siempre que su ancho no sea mayor que un quinto de la longitud de tramo del puente. En el caso de las alas de secciones tipo cajón extremadamente anchas puede ser necesario realizar una investigación especial para determinar los efectos del retraso del corte.

Aunque los resultados citados en el párrafo anterior fueron obtenidos para puentes simplemente apoyados, este criterio también se podría aplicar a los puentes continuos utilizando la longitud de tramo efectiva definida en el presente artículo para la sección considerada.

Al calcular las tensiones de flexión en la sección debidas a las cargas mayoradas se debería utilizar el ancho de ala efectivo. Al calcular la resistencia nominal a la flexión del ala de la sección tipo cajón se debería utilizar el ancho total del ala.

Las secciones tipo cajón cerrado pueden resistir torsión con limitada distorsión de su sección transversal. Debido a que generalmente la distorsión es limitada, la torsión es resistida fundamentalmente mediante flujo de corte por torsión de Saint-Venant. Para las secciones tipo cajón

alas de las secciones tipo cajón, la tensión de corte por torsión de Saint-Venant debido a las cargas mayoradas en Estado Límite de Resistencia no deberá ser mayor que la resistencia mayorada al corte torsional del ala, F_{vr} , tomada como:

$$F_{vr} = 0.75\phi_v \frac{F_{yf}}{\sqrt{3}} \quad (6.11.1.1-1)$$

donde:

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

Además, las tensiones transversales de flexión debidas a la distorsión de la sección transversal se deberán considerar tanto para analizar la fatiga tal como se especifica en el Artículo 6.11.5 como en el Estado Límite de Resistencia. Las tensiones transversales de flexión debidas a las cargas mayoradas no deberán ser mayores que 135 MPa en el Estado Límite de Resistencia. Las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal se deberán considerar para analizar la fatiga tal como se especifica en el Artículo 6.11.5, pero estas tensiones se podrán ignorar en el Estado Límite de Resistencia. Las tensiones transversales de flexión y las tensiones de alabeo longitudinales se deberán determinar por medio de un análisis estructural racional. Los rigidizadores transversales unidos a las almas o alas de las secciones tipo cajón se deberían considerar efectivos para resistir flexión transversal.

cerrado la constante de alabeo es aproximadamente igual a cero. En consecuencia, el corte por alabeo y las tensiones normales debidas a la torsión de alabeo típicamente son bastante pequeñas y por lo general se desprecian.

Las tensiones transversales de flexión en las alas y almas de las secciones tipo cajón debidas a la distorsión de la sección transversal se producen como consecuencia de los cambios de dirección del vector del flujo de corte. La rigidez a flexión transversal de las almas y alas no es suficiente por sí sola para conservar la forma del cajón, de manera que es necesario colocar arriostramiento transversal interno. Además, la mejor manera de controlar las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal también consiste en utilizar arriostramiento transversal interno, tal como se discute en mayor profundidad en el Artículo C6.7.4.3.

Las alas superiores de las vigas tipo omega invertida sujetas a cargas de torsión se deben arriostrar de manera que la sección actúe como un “seudo cajón” para cargas no compuestas aplicadas antes que el tablero de hormigón se endurezca o se vuelva continuo. El arriostramiento del ala superior trabajando conjuntamente con el arriostramiento transversal interno permite conservar la forma del cajón y resistir la fuerza lateral que inducen las almas inclinadas y la torsión.

Tal como se discutirá en el Artículo C6.11.2.3, para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que satisfacen las restricciones especificadas en el Artículo 6.11.2.3, los efectos del corte por torsión de Saint-Venant y las tensiones secundarias debidas a la distorsión de la sección transversal se pueden despreciar, a menos que el ala de la sección tipo cajón sea muy ancha. Al analizar estos puentes también se puede aplicar el factor de distribución de las sobrecargas vivas especificado en el Artículo 4.6.2.2.2b para secciones rectas tipo cajón múltiple de acero. Los puentes que no satisfacen una o más de estas restricciones se deberán investigar utilizando alguno de los métodos de análisis estructural refinado disponibles, ya que el factor de distribución de las sobrecargas vivas especificado no se aplica a este tipo de puentes. En las secciones de este tipo de puentes los efectos del corte por torsión de Saint-Venant y las tensiones secundarias debidas a la distorsión de la sección transversal son también más significativos y por lo tanto deben ser considerados.

En particular, en las secciones tipo cajón simple pueden haber cargas torsionales significativas durante la construcción y bajo la acción de las cargas vivas. Las cargas vivas en el extremo del tablero pueden provocar cargas torsionales críticas sin provocar momentos flectores críticos. En el análisis las cargas vivas se deberían ubicar tanto para la máxima flexión como para la máxima torsión. El estudio debería tomar en cuenta la posición de los apoyos de manera de poder calcular las reacciones de forma

directa.

Cuando sea necesario, el corte por torsión de Saint-Venant y la tensión de corte en los elementos de alma y ala se pueden calcular a partir del flujo de corte, el cual se determina de la siguiente manera:

$$f = \frac{T}{2A_o} \quad (\text{C6.11.1.1-1})$$

donde:

A_o = área encerrada dentro de la sección tipo cajón (mm^2)

f = flujo de corte (N/mm)

T = par torsor interno debido a las cargas mayoradas (N-mm)

En el caso de pares torsores aplicados a la sección no compuesta, A_o se debe calcular para la sección tipo cajón no compuesta. Como se especifica en el Artículo 6.7.5.3, si el arriostramiento lateral superior de una sección tipo omega invertida está unido a las almas, A_o se deberá reducir de manera de reflejar la ubicación real del arriostramiento. Debido a que de acuerdo con estos requisitos se requieren conectores de corte en toda la longitud de las secciones tipo cajón, el tablero de hormigón se puede considerar efectivo para resistir torsión en cualquier punto del tramo. En consecuencia, en el caso de pares torsores aplicados a la sección compuesta en regiones de flexión positiva o negativa, A_o se deberá calcular para la sección compuesta usando la profundidad desde el ala inferior hasta la mitad del espesor del tablero de hormigón. La profundidad se puede calcular usando una estimación de límite inferior del espesor real del enriñonado de hormigón, o bien se puede determinar de manera conservadora despreciando el espesor del enriñonado.

La torsión que actúa en la sección compuesta también introduce corte horizontal en el tablero de hormigón, el cual se debería considerar al diseñar las armaduras. El Artículo C6.11.10 sugiere un procedimiento para determinar el corte torsional en el tablero de hormigón en el caso de las secciones tipo cajón cerrado. En el caso de las secciones en forma de omega invertida se debería suponer que el tablero resiste la totalidad del corte torsional que actúa sobre la sección tipo cajón compuesta.

Las Especificaciones anteriores (AASHTO 1993) limitaban la resistencia nominal al corte por torsión de Saint-Venant de las alas de las secciones tipo cajón a la tensión de fluencia por corte, $F_{yf}/\sqrt{3}$. Sin embargo, para este nivel de tensión de corte hay una reducción significativa de la resistencia nominal a la flexión del ala.

Por lo tanto, estos requisitos limitan la resistencia nominal al corte a $0.75F_{yf}/\sqrt{3}$. Este nivel de tensión de corte torsional rara vez se encuentra en los diseños de vigas tipo cajón que se utilizan en la práctica.

Cuando sea necesario, las tensiones de flexión transversales o en la dirección del espesor, así como los rangos de tensión en las almas y alas debidas a la distorsión de la sección transversal, se pueden determinar utilizando la analogía de la viga sobre fundación elástica (BEF, por sus siglas en inglés) presentada por Wright y Abdel-Samad (1968). En este método el arriostramiento transversal interno es análogo a los apoyos intermedios de la viga sobre fundación elástica, y la resistencia a la distorsión que provee la sección transversal tipo cajón es análoga a una fundación elástica. La deflexión de la viga sobre fundación elástica es análoga a la tensión de flexión transversal. Al calcular las rigideces de estos elementos, los rigidizadores transversales se deberían considerar efectivos con el alma o el ala de la sección tipo cajón, según corresponda. En las publicaciones de Heins y Hall (1981) y AASHTO (2003) el lector encontrará ejemplos de cálculos realizados en base a la analogía de la viga sobre fundación elástica. Las tensiones de flexión transversales son particularmente importantes en el caso de los cajones que pueden estar sujetos a grandes pares torsores, por ejemplo los cajones sobre apoyos oblicuos. Utilizar análisis por elementos finitos para determinar las tensiones de flexión en la dirección del espesor resulta bastante problemático.

Las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal también se pueden determinar usando la analogía de la viga sobre fundación elástica. La tensión de alabeo es análoga al momento en la viga sobre fundación elástica. Las tensiones de alabeo son mayores en las esquinas del cajón, donde generalmente están ubicados los detalles soldados, y deberían ser consideradas al analizar la fatiga (Wright y Abdel-Samad 1968). Ensayos realizados indican que estas tensiones de alabeo no afectan la resistencia última de las vigas tipo cajón de las dimensiones habituales.

Debido a que el arriostramiento lateral superior de las vigas tipo omega invertida contribuye a su rigidez flexional, al calcular las propiedades de la sección de estas vigas se debería considerar incluir la componente longitudinal del área de arriostramiento del ala superior. Si se utilizan, los rigidizadores de ala longitudinales también se deberían incluir al determinar las propiedades de la sección del cajón u omega invertida.

6.11.1.2 Apoyos

Se podrán utilizar apoyos simples o dobles. Se pueden colocar apoyos dobles ya sea del lado interior o exterior de las almas de la sección tipo cajón. Si se utilizan apoyos

C6.11.1.2

La disposición de los apoyos determina la manera en que es resistida la torsión, y es especialmente crítica en el caso de las secciones tipo cajón simple. Cuando se utiliza

simples de menor ancho que el ala inferior, éstos se deberán alinear con el centro de corte de la sección tipo cajón, y los demás apoyos deberán ser adecuados para asegurar que ninguna combinación de cargas provoque un vuelco. Si se utilizan apoyos de amarre las solicitaciones resultantes se deberán considerar en el diseño.

6.11.1.3 Uniones entre ala y alma

A menos que se especifique lo contrario, el espesor efectivo total de las soldaduras entre un ala y un alma no deberá ser menor que el espesor del alma o del ala, cualquiera sea el valor que resulte menor.

Cuando en cada tramo se provean dos o más diafragmas internos intermedios estará permitido utilizar soldaduras de filete para realizar las uniones entre un ala y un alma. El tamaño de las soldaduras no deberá ser menor que el tamaño que satisfaga los requisitos del Artículo 6.13.3.4. Si se utilizan soldaduras de filete, éstas se deberán ubicar a ambos lados de la placa de unión del ala o el alma.

6.11.1.4 Bocas de acceso y drenaje

Las bocas de acceso de las secciones tipo cajón deberían estar ubicadas en el ala inferior en zonas de baja tensión. Se debería investigar el efecto de las bocas de acceso sobre las tensiones en las alas a fin de determinar si se requieren refuerzos. Se debería prever la ventilación y el drenaje de

una disposición con un único apoyo, el par torsor se puede eliminar de las secciones tipo cajón múltiple colocando marcos transversales o diafragmas entre los diferentes cajones. Se pueden colocar apoyos dobles entre las almas del cajón o del lado exterior del cajón. Colocar los apoyos del lado exterior del cajón reduce las cargas de vuelco sobre los apoyos y puede eliminar la fuerza de levantamiento. El levantamiento puede ser particularmente crítico en el caso de los apoyos dobles si los vuelos del tablero tienen grandes dimensiones y en los bordes de los mismos se colocan parapetos o barreras sonoras. El levantamiento se debería verificar ignorando los efectos de la futura superficie de rodamiento.

Para las secciones tipo cajón, en lugar de utilizar apoyos a menudo se utilizan vigas cabezal integrales de acero u hormigón.

C6.11.1.3

Si en cada tramo no se proveen como mínimo dos marcos transversales o diafragmas internos intermedios es fundamental que el tamaño de las soldaduras entre las almas y las alas sea suficiente para desarrollar la sección total del alma o del ala, cualquiera sea el valor que resulte menor. En este caso, debido a la posibilidad de que en la sección tipo cajón se desarrollen tensiones de flexión secundarias como consecuencia de las vibraciones y/o distorsiones de la sección transversal, se deberían proveer soldaduras que abarquen todo el espesor. Haaijer (1981) demostró que en las uniones soldadas entre un alma y un ala de este tipo de secciones el rango de tensiones transversales secundarias debidas a la distorsión se reduce más del 50 por ciento cuando se introduce un marco transversal interno intermedio y más del 80 por ciento cuando se introducen dos marcos transversales internos intermedios en cada tramo. Por este motivo, cuando en cada tramo se proveen dos o más marcos transversales o diafragmas internos intermedios, se asume que es adecuado utilizar soldaduras de filete diseñadas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.13.3.4 a ambos lados del alma.

Cuando se utilizan soldaduras de penetración total o de filete es fundamental ubicar las soldaduras a ambos lados de la placa de unión del ala o alma. Esto ayudará a minimizar la posibilidad de que las tensiones transversales de flexión provoquen una falla por fatiga.

C6.11.1.4

Las bocas de acceso exteriores deberían tener un tamaño suficiente para permitir un fácil acceso para realizar inspecciones. Las puertas de las bocas de acceso exteriores deberían estar montadas sobre bisagras y estar equipadas con cerraduras o candados. Todas las aberturas en el

las secciones tipo cajón interiores.

exterior de las vigas tipo cajón se deberían cubrir con tejido metálico de manera de evitar el ingreso de personal no autorizado, aves e insectos.

Se debería considerar pintar el interior de las secciones tipo cajón de un color claro. El interior de estas secciones se pinta fundamentalmente para facilitar las inspecciones y, en el caso de las secciones tipo omega invertida, para evitar la ganancia solar y para proveerle al acero un nivel mínimo de protección contra la intemperie mientras la sección tipo omega invertida permanece abierta durante su construcción. No es necesario que la calidad de la pintura sea la que habitualmente se utiliza para pintar las superficies exteriores. En la mayoría de los casos una sola capa de pintura debería ser suficiente, particularmente si se prevé la ventilación y el drenaje del interior de los cajones.

6.11.2 Límites aplicables a las dimensiones de la sección transversal

6.11.2.1 Dimensiones del alma

6.11.2.1.1 Disposiciones generales

Las almas podrán ser inclinadas o verticales. La inclinación de las placas de alma respecto de un plano normal al ala inferior no debería ser mayor que 1 en 4. En el caso de las almas inclinadas, para verificar todos los requisitos de diseño se deberá utilizar la distancia medida a lo largo del alma. Las almas unidas a las alas superiores de las secciones tipo omega invertida se deberán unir a la mitad del ancho de las alas.

C6.11.2.1.1

Las almas inclinadas tienen la ventaja de reducir el ancho del ala inferior.

No se deben utilizar alas superiores de secciones tipo omega invertida con almas en ubicaciones diferentes a la mitad del ancho de las alas, ya que se introducirían solicitaciones adicionales de flexión lateral de las alas para las cuales sería necesario realizar una investigación especial.

6.11.2.1.2 Almas sin rigidizadores longitudinales

Las almas se deberán dimensionar de manera que:

$$\frac{D}{t_w} \leq 150 \quad (6.11.2.1.2-1)$$

C6.11.2.1.2

La Ecuación 1 se discute en el Artículo C6.10.2.1.1.

6.11.2.1.3 Almas con rigidizadores longitudinales

Las almas se deberán dimensionar de manera que:

$$\frac{D}{t_w} \leq 300 \quad (6.11.2.1.3-1)$$

C6.11.2.1.3

La Ecuación 1 se discute en el Artículo C6.10.2.1.2.

6.11.2.2 Dimensiones de las alas

Las alas de las secciones tipo omega invertida sujetas a compresión o tracción se deberán diseñar de manera que:

C6.11.2.2

Las Ecuaciones 1 a 3 se aplican a las alas de las secciones doble Te y también se aplican a una única ala superior de una sección tipo omega invertida. Las Ecuaciones 1 a 3 se discuten en el Artículo C6.10.2.2.

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq 12.0 \quad (6.11.2.2-1)$$

$$b_f \geq D/6 \quad (6.11.2.2-2)$$

y

$$t_f \geq 1.1t_w \quad (6.11.2.2-3)$$

6.11.2.3 Restricciones especiales aplicables al uso del factor de distribución de las sobrecargas vivas en el caso de las secciones tipo cajón múltiple

Las secciones transversales de los puentes rectos que consisten en dos o más secciones tipo cajón de una sola celda, para las cuales el momento flector en cada cajón debido a la sobrecarga viva se determina de acuerdo con los requisitos del Artículo 4.6.2.2.2b, deberán satisfacer las restricciones geométricas aquí especificadas. Además, las líneas de apoyo no deberán ser oblicuas.

La distancia entre los centros de las alas de dos cajones adyacentes, a , medida a la mitad del tramo, no deberá ser mayor que 120 por ciento ni menor que 80 por ciento de la distancia entre los centros de las alas de cada uno de los cajones adyacentes, w , tal como se ilustra en la Figura 1. Además de este requisito que se debe satisfacer a la mitad del tramo, cuando se utilicen secciones tipo cajón no paralelas, en los apoyos la distancia entre los centros de las alas de los cajones adyacentes no deberá ser mayor que 135 por ciento ni menor que 65 por ciento de la distancia entre los centros de las alas de cada uno de los cajones adyacentes. Las distancias entre los centros de las alas de cada uno de los cajones individuales deberán ser iguales.

La inclinación de las placas de alma respecto de un plano normal al ala inferior no deberá ser mayor que 1 en 4.

El vuelo del tablero de hormigón, incluyendo el cordón y el parapeto, no deberá ser mayor que 60 por ciento de la distancia promedio entre los centros de las alas de acero superiores de las secciones tipo cajón adyacentes, a , o 1800 mm, cualquiera sea el valor que resulte menor.

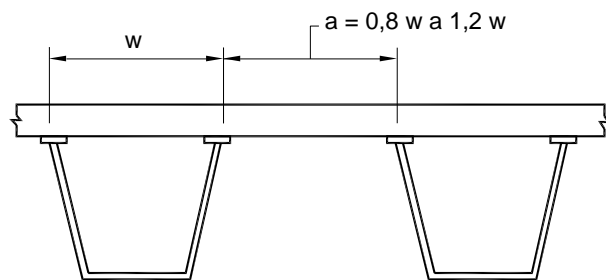


Figura 6.11.2.3-1 Distancia entre los centros de las alas

Las alas de las secciones tipo cajón se deberían prolongar al menos una pulgada más allá de la cara externa de cada alma para que sea posible soldar las almas al ala. El Ingeniero debería considerar proveer en los planos de diseño una opción para que, en caso de ser necesario, el fabricante aumente esta distancia con el objetivo de facilitar el acceso de los soldadores.

C6.11.2.3

Las restricciones que se especifican en este artículo para los puentes rectos que utilizan secciones tipo cajón múltiple son necesarias si se desea emplear el factor de distribución lateral de las sobrecargas vivas indicado en el Artículo 4.6.2.2.2b para secciones rectas tipo cajón múltiple de acero. Este factor de distribución fue desarrollado en base a un exhaustivo estudio de puentes que satisfacen estas limitaciones (*Johnston y Mattock 1967*). En este estudio para la sección compuesta se supuso una rigidez no fisurada a lo largo de la totalidad del tramo.

Además, se determinó que cuando se satisfacen estas restricciones el corte debido a la torsión de Saint-Venant y los efectos de la tensión de flexión debida a la distorsión de la sección transversal se pueden despreciar siempre que el ancho del ala de la sección tipo cajón no sea mayor que un quinto de la longitud de tramo efectiva definida en el Artículo 6.11.1.1. En base a un estudio analítico sobre este tipo de puentes se determinó que cuando estos puentes se cargan de manera de producir el máximo momento en una viga determinada, y por consiguiente la máxima compresión en la placa de ala cerca de un apoyo intermedio, la cantidad de torsión en dicha viga es despreciable. Por lo tanto, pareciera razonable que, para los puentes que se ajustan a las limitaciones indicadas en este artículo y en los cuales las alas son totalmente efectivas, no es necesario considerar el corte debido a la torsión al diseñar las alas para las cargas máximas de compresión o tracción.

En el caso de los puentes con apoyos oblicuos, en las secciones tipo cajón ocurren efectos torsionales adicionales y la distribución lateral de las cargas también se ve afectada. Aunque el puente satisfaga las restricciones especificadas en este artículo, estos efectos no son contemplados por el factor de distribución lateral de las cargas especificado en el Artículo 4.6.2.2.2b. Por lo tanto, en estos casos es necesario realizar un análisis de tensiones más riguroso usando alguno de los métodos de análisis estructural refinado disponibles. Para las partes rectas de los

puentes que satisfacen estas restricciones pero que también contienen segmentos curvos en el plano horizontal también se recomienda realizar un análisis refinado. Aunque no son obligatorios, si el Ingeniero así lo desea también puede utilizar métodos de análisis estructural refinado para los puentes que satisfacen las limitaciones del presente artículo.

Se han establecido algunas limitaciones sobre la variación de la distancia a respecto de la distancia w ilustradas en la Figura 1 que se deben aplicar si se utiliza el factor de distribución, ya que los estudios en los cuales se basan los requisitos sobre el factor de distribución de las sobrecargas vivas se realizaron en puentes en los cuales a era igual a w . Las limitaciones indicadas para secciones tipo cajón no paralelas permitirán cierta flexibilidad en el diseño, a la vez que mantendrán la validez general de los requisitos. Para los casos con secciones tipo cajón no paralelos en los que se utiliza el factor de distribución de las sobrecargas vivas, ver los requisitos del Artículo 4.6.2.2.2b.

6.11.3 Construibilidad

6.11.3.1 Disposiciones generales

A menos que se especifique lo contrario, se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.3.

La geometría de las secciones tipo cajón individual se deberá mantener durante todas las etapas de la construcción. Se deberá investigar si es necesario utilizar diafragmas o marcos transversales internos intermedios, diafragmas o marcos transversales externos, arriostramiento lateral superior u otros elementos temporarios o permanentes para asegurar que se controle la deformación de la sección tipo cajón.

6.11.3.2 Flexión

Para las etapas críticas de la construcción, los requisitos de los Artículos 6.10.3.2.1 a 6.10.3.2.3 se deberán aplicar solamente a las alas superiores de las secciones tipo omega invertida. La longitud no arriostrada se debería tomar como la distancia entre los marcos transversales o diafragmas interiores. Los requisitos del Artículo A6.3.3 no se deberán aplicar al determinar la resistencia al pandeo lateral torsional de las alas superiores de las secciones tipo omega invertida con almas compactas o no compactas.

Para las etapas críticas de la construcción, las alas comprimidas de las secciones tipo cajón deberán satisfacer

C6.11.3.1

El Ingeniero debería considerar las cargas excéntricas que potencialmente podrían ocurrir durante la construcción. Estas podrían incluir la colocación no uniforme del hormigón y los equipos. Los diafragmas o marcos transversales temporarios que no forman parte del diseño original se deberían retirar, ya que estos elementos podrían afectar significativamente el comportamiento estructural de la sección tipo cajón, incluyendo la distribución de las cargas.

El lector encontrará información adicional sobre la construcción de secciones tipo cajón compuestas en NSBA (1978) y United States Steel (1978).

En el caso de las secciones tipo cajón pintadas el Ingeniero debería considerar el peso de la pintura. Para las estructuras habituales una estimación razonable del peso de la pintura es tres por ciento del peso del acero.

C6.11.3.2

Aunque las ecuaciones de los Artículos 6.10.3.2.1 a 6.10.3.2.3 se aplican a las alas de las secciones doble Te, éstas también se pueden aplicar a una única ala superior de una sección tipo omega invertida. Cuando se utilizan estas ecuaciones también se aplican los requisitos del Artículo 6.10.1.6.

A criterio del Ingeniero, los elementos de arriostramiento lateral superior unidos a las alas en puntos en los cuales entre las alas solamente existen puntales podrán ser considerados como puntos de arriostramiento.

En el caso de las vigas rectas, en las alas superiores con

los siguientes requisitos:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc} \quad (6.11.3.2-1)$$

y:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{crw} \quad (6.11.3.2-2)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_{bu} = tensión longitudinal en el ala debida a las cargas mayoradas en la sección considerada calculada sin considerar el alabeo longitudinal (MPa)

F_{crw} = resistencia nominal al pandeo flexional del alma especificado en el Artículo 6.10.1.9 (MPa)

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión de un ala de compresión de una sección tipo cajón determinada como se especifica en el Artículo 6.11.8.2 (MPa). Al calcular F_{nc} para determinar la construibilidad el factor de balanceo de las cargas, R_b , se deberá tomar igual a 1.0.

Para las secciones con almas compactas o no compactas no será necesario verificar la Ecuación 2.

Para las etapas críticas de la construcción, las alas de las secciones tipo cajón no compuestas traccionadas y las alas de las secciones tipo cajón con apoyo lateral continuo traccionadas o comprimidas deberán satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} \leq \phi_f R_h F_{yf} \Delta \quad (6.11.3.2-3)$$

donde:

$$\Delta = \sqrt{1 - 3 \left(\frac{f_v}{F_{yf}} \right)^2} \quad (6.11.3.2-4)$$

f_v = tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala debida a las cargas mayoradas en la sección considerada (MPa)

$$= \frac{T}{2A_o t_f} \quad (6.11.3.2-5)$$

y donde:

arriostramiento discreto de las secciones tipo omega invertida, antes que el tablero se haya endurecido o vuelto compuesto se produce flexión lateral debido a la acción del viento y la torsión de diversos orígenes. Las ecuaciones de los Artículos 6.10.3.2.1 y 6.10.3.2.2 le permiten al Ingeniero considerar directamente los efectos de la flexión lateral de las alas si a su criterio resultan significativos. Si el Ingeniero considera que los efectos de la flexión lateral de las alas son insignificantes o incidentales, en estas ecuaciones el término f_t simplemente se iguala a cero. En este caso el formato de las ecuaciones se reduce al formato más convencional que se utiliza para verificar las alas para los estados límite de fluencia, pandeo lateral torsional o pandeo local, según corresponda, en ausencia de flexión lateral de las alas. Para las cargas que se aplican durante la construcción una vez que las alas tienen apoyo lateral continuo se aplican los requisitos del Artículo 6.10.3.2.3. El Artículo 6.10.3.2 distingue entre alas con arriostramiento discreto y continuo debido a que para las alas con arriostramiento continuo no es necesario considerar la flexión lateral de las alas. El Artículo C6.10.1.6 establece las condiciones bajo las cuales se puede considerar que un ala tiene apoyo lateral o arriostramiento continuo. Típicamente en las alas superiores con apoyo continuo de las secciones tipo omega invertida también se desprecian los cortes debidos a la torsión de Saint-Venant. Al verificar los requisitos de los Artículos 6.10.3.2.1 a 6.10.3.2.3 para el ala superior única de una viga tipo omega invertida se recomienda realizar las verificaciones considerando la mitad de la sección tipo omega invertida.

Al verificar la Ecuación 6.10.3.2.1-2 para secciones doble Te con almas compactas o no compactas, opcionalmente el Artículo A6.3.3 permite determinar la resistencia al pandeo lateral torsional del ala de compresión considerando la contribución beneficiosa de la constante torsional J . Conservadoramente, se prohíbe utilizar estos requisitos para verificar las alas superiores de las secciones tipo omega invertida con almas compactas o no compactas. En el Artículo C6.10.6.2.3 se discuten las definiciones de alma compacta, no compacta y esbelta. Para realizar estas verificaciones con la sección en su condición no compuesta, la clasificación del alma se ha de basar en las propiedades de la sección no compuesta.

Una fuente potencial de flexión lateral de las alas debida a la torsión son las cargas excéntricas del vuelo del tablero de hormigón que actúan sobre las ménsulas en voladizo dispuestas a lo largo de las vigas tipo omega invertida exteriores. En ausencia de un análisis más refinado, los máximos momentos de flexión lateral de las alas en el ala superior más externa de una omega invertida debidos a estas cargas excéntricas se pueden estimar usando ya sea la Ecuación C6.10.3.4-2 o bien la Ecuación C6.10.3.4-3 dependiendo de cómo se supone que la carga lateral se

A_o = área encerrada dentro de la sección tipo cajón (mm^2)

R_h = factor de híbridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

T = par torsor interno debido a las cargas mayoradas (N-mm)

Para las cargas que se aplican al ala de una sección tipo cajón compuesta antes que el hormigón se haya endurecido o vuelto compuesto, el ala se deberá diseñar como un ala no compuesta. La máxima deflexión vertical del ala no compuesta debida a las cargas permanentes no mayoradas, incluyendo el peso propio del ala, y las cargas constructivas no mayoradas no deberá ser mayor que 1/360 por la separación transversal entre las almas. La tensión de flexión en la dirección del espesor del ala no compuesta debida a las cargas permanentes mayoradas y las cargas constructivas mayoradas no deberá ser mayor que 135 MPa. El peso del hormigón húmedo y otras cargas temporarias o permanentes aplicadas sobre el ala no compuesta se podrán considerar suponiendo que el ala de la sección tipo cajón actúa como una viga simple entre las almas. Las alas se podrán rigidizar cuando sea necesario para controlar la deflexión de las alas y las tensiones debidas a las cargas que se aplican antes que el hormigón se haya endurecido o vuelto compuesto.

aplica al ala.

En las secciones tipo cajón con almas inclinadas, la variación de la componente horizontal del corte debido a la carga permanente del alma más la variación del corte por torsión de Saint-Venant debido a la carga permanente por unidad de longitud del elemento actúan como una carga transversal uniformemente distribuida sobre las alas de las vigas. Puede ser necesario colocar marcos transversales internos intermedios, diafragmas o puntales adicionales para reducir la flexión lateral que esta carga transversal provoca en las alas superiores de secciones tipo omega invertida con arriostramiento discreto. Esto puede ser particularmente cierto en los casos en los cuales se permite que la inclinación de las placas de alma respecto de un plano normal al ala inferior sea mayor que 1 en 4, y/o cuando la longitud no arriostrada de las alas superiores es mayor que 9000 mm. Caso contrario, típicamente esta carga transversal se puede ignorar. En ausencia de un análisis más refinado, los máximos momentos de flexión lateral de las alas debidos a esta carga transversal se pueden estimar usando la Ecuación C6.10.3.4-2, tomando F_t como la magnitud de la carga transversal uniformemente distribuida. Se debería asumir que la totalidad de la carga transversal se aplica sobre las alas superiores (*Fan y Helwig 1999*). Se puede asumir que el marco transversal o puntal soporta la totalidad de la carga transversal dentro del panel considerado.

Otra potencial fuente de flexión lateral de las alas son las fuerzas que se desarrollan en los sistemas de arriostramiento lateral superior tipo Warren de una sola diagonal debido a la flexión de la sección tipo omega invertida. En ausencia de un análisis más refinado, *Fan y Helwig (1999)* proporcionan un enfoque para estimar las fuerzas en los elementos de arriostramiento lateral debidas a la flexión y a las tensiones de flexión lateral en el ala superior resultantes de dichas fuerzas. Si fuera necesario, la manera más efectiva de mitigar este efecto probablemente sea utilizando alternativamente elementos individuales de una diagonal paralelos en cada vano.

En aquellos casos en los cuales dentro de una sección tipo omega invertida no se utiliza un sistema de arriostramiento lateral que abarque la totalidad de la longitud, tal como se discute en mayor profundidad en el Artículo C6.7.5.3, el ancho mínimo de las alas superiores dentro de cada pieza armada en obra debería satisfacer los lineamientos dados por la Ecuación C6.10.3.4-1, juntamente con los límites aplicables a las dimensiones de las alas especificados en el Artículo 6.11.2.2 En este caso, en la Ecuación C6.10.3.4-1, L se debe tomar como la mayor de las distancias a lo largo de la pieza armada en obra entre paneles de arriostramiento lateral o entre un panel de arriostramiento lateral y el extremo de la pieza. En aquellos casos en los cuales se utiliza un sistema de arriostramiento

lateral que abarca la totalidad de la longitud no es necesario considerar la Ecuación C6.10.3.4-1 para las alas superiores de las vigas tipo omega invertida.

Para las alas de las secciones tipo cajón no compuestas en compresión, el pandeo local del ala durante las etapas críticas de la construcción se verifica de acuerdo con la Ecuación 1. Para las alas de las secciones tipo cajón no es necesario verificar la flexión lateral de las alas ni el pandeo lateral torsional.

La Ecuación 2 asegura que durante la construcción no se producirá pandeo flexional teórico del alma cuando las alas no compuestas de la sección tipo cajón están sujetas a compresión. La Ecuación 6.10.3.2.1-3 cumple una función similar en las secciones en las cuales las alas superiores de las secciones tipo omega invertida están sujetas a compresión. En ambos casos, para las secciones tipo cajón con almas inclinadas, al determinar la resistencia al pandeo flexional del alma, F_{crw} , D_c se debería tomar como la profundidad comprimida del alma medida a lo largo de la pendiente. Debido a que la tensión en las alas se limita a la tensión de pandeo flexional del alma, el factor R_b siempre se debe tomar igual a 1.0 cuando se calcula la resistencia nominal a la flexión del ala de compresión al analizar la construibilidad. En el Artículo C6.10.3.2.1 se discuten opciones a considerar si el ala no satisface la Ecuación 2 o la Ecuación 6.10.3.2.1-3, según corresponda, para la condición de construcción. Para las secciones con almas compactas o no compactas el pandeo flexional del alma no constituye un problema y por lo tanto en estas secciones no es necesario verificarlo.

Para las alas de las secciones tipo cajón no compuestas traccionadas, o para las alas de las secciones tipo cajón con apoyo lateral continuo traccionadas o comprimidas, en la Ecuación 3 se utiliza el criterio de fluencia de von Mises (*Boresi et al. 1978*) para considerar el efecto del corte torsional.

Típicamente no es necesario considerar las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal al verificar las Ecuaciones 1 y 3, pero en cambio sí es necesario considerarlas al verificar el deslizamiento de las uniones en los empalmes abulonados de las alas para la condición de construcción tal como se especifica en el Artículo 6.13.6.1.4c.

En las secciones tipo cajón cerrado, las alas no compuestas en la parte superior del cajón reciben el peso del hormigón húmedo y otras cargas durante la etapa de la construcción y antes que el tablero se endurezca o se vuelva compuesto. Para controlar la deflexión y las tensiones de las alas de las secciones tipo cajón puede ser necesario rigidizar transversal y/o longitudinalmente dichas alas.

6.11.3.3 Corte

Al verificar el requisito sobre corte especificado en el

Artículo 6.10.3.3 también se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.11.9, si es que corresponde.

6.11.4 Estado Límite de Servicio

A menos que se especifique lo contrario, se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.4.

En la Ecuación 6.10.4.2.2-2 el término f_t se deberá tomar igual a cero. No se aplicará la Ecuación 6.10.4.2.2-3. Excepto para las secciones en flexión positiva en las cuales el alma satisface los requisitos del Artículo 6.11.2.1.2, todas las secciones deberán satisfacer la Ecuación 6.10.4.2.2-4.

No se deberá aplicar la redistribución del momento negativo debido a las cargas correspondientes a Estado Límite de Servicio II en las secciones sobre pilas interiores de los elementos flexionales continuos usando los procedimientos especificados en el Apéndice B.

C6.11.4

El Artículo 6.10.4.1 hace referencia a los requisitos del Artículo 2.5.2.6, los cuales contienen criterios opcionales para las deflexiones debidas a la sobrecarga y criterios aplicables a las relaciones longitud de tramo-profundidad. En ausencia de restricciones que limiten la profundidad, para establecer una profundidad de alma mínima razonable para el diseño se pueden utilizar las mismas relaciones longitud de tramo-profundidad listadas para las secciones doble Te. Sin embargo, debido a la rigidez torsional propia de las secciones tipo cajón, la profundidad óptima para una sección tipo cajón será en general algo menor que la profundidad óptima para una sección doble Te de la misma longitud de tramo. Como típicamente es poco habitual que el tamaño de las alas de las secciones tipo cajón varíe a lo largo de la longitud del puente, establecer una profundidad óptima razonable es particularmente importante en el caso de las secciones tipo cajón. Los cajones excesivamente bajos pueden estar sujetos a importantes cortes torsionales.

Bajo las combinaciones de cargas especificadas en la Tabla 3.4.1-1, solamente es necesario verificar las Ecuaciones 6.10.4.2.2-1 y 6.10.4.2.2-2 para las secciones compactas en flexión positiva. Estas ecuaciones no son determinantes para las secciones en flexión negativa y para las secciones no compactas en flexión positiva, por lo que no es necesario verificarlas. Sin embargo, cuando corresponda, para estas secciones sí se deberá verificar la Ecuación 6.10.4.2.2-4.

La flexión lateral de las alas no constituye una preocupación para las alas de las secciones tipo cajón y por lo tanto no es necesario considerarla al verificar la Ecuación 6.10.4.2.2-2. En la Ecuación 6.10.4.2.2-1 no se considera la flexión lateral de las alas porque en el Estado Límite de Servicio las alas superiores tienen apoyo lateral continuo. Al verificar las ecuaciones del Artículo 6.10.4.2.2 no es necesario considerar las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal, pero sí es necesario considerarlas al verificar el deslizamiento de las uniones en los empalmes abulonados de las alas para la condición de construcción tal como se especifica en el Artículo 6.13.6.1.4c. Tampoco se consideran las tensiones de corte por torsión de Saint-Venant al verificar las ecuaciones del Artículo 6.10.4.2.2 para las alas de las secciones tipo cajón. Se considera que la influencia de las tensiones longitudinales de alabeo y el corte torsional sobre las deflexiones globales permanentes en el Estado Límite de Servicio son relativamente insignificantes.

Para las secciones tipo cajón con almas inclinadas, al determinar la resistencia al pandeo flexional del alma, F_{crw} ,

6.11.5 Estado Límite de Fatiga y Fractura

A menos que se especifique lo contrario, se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.5.

Para verificar la fatiga en los conectores de corte también se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.11.10, según corresponda. Los requisitos para fatiga en los conectores de corte especificados en el Artículo 6.10.10.3 no se aplicarán.

Al verificar el requisito sobre corte especificado en el Artículo 6.10.5.3 también se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.11.9, según corresponda.

Para las secciones tipo cajón simple, y para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son totalmente efectivas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1, se deberán considerar las tensiones de alabeo longitudinales y las tensiones de flexión transversales debidas a la distorsión de la sección transversal. Al verificar la resistencia a la fatiga del metal base en todos los detalles de la sección tipo cajón de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.6.1 se deberá considerar el rango de tensiones debidas al alabeo longitudinal. Al evaluar la resistencia a la fatiga del metal base adyacente a las soldaduras de filete entre un ala y un alma y adyacente a la terminación de las soldaduras de filete que conectan elementos transversales a las almas y alas de las secciones tipo cajón, el rango de tensiones de flexión transversal se deberá considerar separadamente. Para determinar el rango de tensiones de flexión transversales, un ciclo de tensión se definirá como 75 por ciento del rango de tensiones determinado por el paso de la carga de fatiga en dos posiciones transversales diferentes. En ningún caso el rango de tensiones calculado de este modo podrá ser menor que el rango de tensiones debido a un único paso de la carga de fatiga mayorada.

Para las secciones tipo cajón simple, las alas traccionadas se deberán considerar de fractura crítica, a menos que un análisis estadístico demuestre que luego de sufrir una fractura total del ala en cualquier punto la sección puede soportar la totalidad de la carga permanente y la sobrecarga.

utilizada para verificar la Ecuación 6.10.4.2.2-4, D_c se debería tomar como la profundidad comprimida del alma medida a lo largo de la pendiente.

Aún no se ha comprobado que los requisitos opcionales del Apéndice B sean aplicables a las secciones tipo cajón. Por lo tanto, estos requisitos no se pueden utilizar para diseñar secciones tipo cajón.

C6.11.5

Cuando las secciones tipo cajón están sujetas a cargas excéntricas su sección transversal se distorsiona, lo que origina tensiones de flexión secundarias. Al cargar el lado opuesto del puente se produce una inversión de las tensiones y, por lo tanto, posibles efectos de fatiga. Las máximas tensiones y rangos de tensiones ocurren en la viga central de los puentes que tienen un número impar de vigas.

Los rangos de tensiones de flexión transversal y alabeo longitudinal debidos a la distorsión de la sección transversal se pueden determinar usando la analogía de la viga sobre fundación elástica (BEF, según sus siglas en inglés), tal como se discutió en el Artículo C6.11.1.1. Cuando se considera el alabeo longitudinal, el rango de tensiones longitudinales se debe calcular como la sumatoria del rango de tensiones debido a flexión respecto del eje mayor más el rango de tensiones debido al alabeo longitudinal.

Generalmente el mayor rango de tensiones de flexión transversal es el que provoca la carga de fatiga mayorada actuando en dos posiciones transversales diferentes. Este ciclo de tensiones se produce cuando dos vehículos atraviesan el puente sobre carriles diferentes, uno de los vehículos más adelantado que el otro. Estos requisitos toman en cuenta este ciclo al determinar el rango de pares torsores, y consecuentemente el rango de tensiones de flexión transversal resultante, suponiendo dos ubicaciones transversales y aplicando un factor de 0.75 para considerar la posibilidad de que dos vehículos se ubiquen en la posición relativa crítica. En ningún caso el rango de tensiones calculado debe ser menor que el rango de tensiones debido a un único paso de la carga de fatiga mayorada. No se toma en cuenta el hecho de que se requieren dos vehículos para provocar el mayor ciclo de tensiones posible. Para aquellos casos en los cuales la resistencia nominal a la fatiga no es determinada por el umbral de fatiga para amplitud constante, es posible que el Ingeniero desee considerar una reducción del número de ciclos.

Probablemente el caso más crítico para flexión transversal se dé en el metal base donde terminan las soldaduras de filete que conectan elementos transversales a las almas y alas de las secciones tipo cajón. Para este caso, el metal base adyacente a las soldaduras se debería verificar considerando las Categorías E o E', según corresponda. Si

fuera necesario reducir el rango de tensiones de flexión transversal se podría considerar el uso de rigidizadores de alma transversales que no funcionen como placas de unión, fijándolos a las alas superior e inferior. El hecho de fijar rigidizadores transversales a las alas reduce las tensiones de flexión en la dirección del espesor dentro de las partes no rigidizadas del alma donde terminan las soldaduras entre el rigidizador y el alma, que es generalmente la sección más crítica para esta verificación. Los requisitos del Artículo 6.6.1.3.1 ya exigen que los marcos transversales de unión estén conectados a las alas superiores e inferiores.

Tal como se discutió en el Artículo C6.7.4.3, para aquellos casos en los cuales se considera que la torsión de Saint-Venant es significativa se debería considerar proveer elementos de arriostramiento transversales inferiores como parte del arriostramiento interior a fin de controlar la distorsión de las alas de la sección tipo cajón. Si los elementos de arriostramiento transversales se sueldan directamente al ala de la sección tipo cajón, al verificar la resistencia a la fatiga del metal base adyacente a la terminación de estas soldaduras también se debería considerar el rango de tensiones debido a la flexión transversal.

Como el tablero de hormigón es mucho más rígido que el arriostramiento, generalmente en las secciones tipo omega invertida la fatiga inducida por las cargas no resulta crítica para el arriostramiento lateral superior. Por este motivo habitualmente las fuerzas debidas a la sobrecarga en el arriostramiento son relativamente pequeñas, particularmente cuando el arriostramiento lateral está conectado directamente a las alas superiores, lo cual constituye el diseño preferido. Aún así, cuando corresponda, se deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.6.1.3.2 para evitar los potenciales problemas que podrían resultar de la fatiga inducida por distorsión.

Puede haber excepciones en las cuales no sea necesario considerar las alas traccionadas de las secciones tipo cajón simple como elementos de fractura crítica. Por ejemplo, las alas superiores con apoyo lateral continuo en regiones de flexión negativa cuando la armadura del tablero es adecuada para que actúe como un ala superior. En estos casos también se debe proveer una conexión de corte adecuada.

6.11.6 Estado Límite de Resistencia

6.11.6.1 Disposiciones generales

Para los propósitos del presente artículo se deberán aplicar las combinaciones de cargas para Estado Límite de Resistencia especificadas en la Tabla 3.4.1-1.

C6.11.6.1

En el Estado Límite de Resistencia, el Artículo 6.10.6 refiere al Ingeniero a los artículos aplicables para el diseño de secciones tipo cajón en regiones de flexión positiva o negativa.

6.11.6.2 Flexión

6.11.6.2.1 Disposiciones generales

Si en la sección considerada hay orificios en el ala de tracción, el ala de tracción también deberá satisfacer el requisito especificado en el Artículo 6.10.1.8.

6.11.6.2.1

La intención del requisito del Artículo 6.10.1.8 es evitar la fractura de la sección neta en las secciones transversales que tienen orificios en el ala de tracción, ya sea que estas secciones estén sujetas a flexión positiva o negativa. Cuando en el ala traccionada se provee una boca de acceso, al determinar la sección bruta para verificar este requisito se debería deducir el área del orificio, tal como se especifica en el Artículo 6.8.1.

Se asume que un ala con apoyo lateral continuo comprimida no está sujeta a pandeo local o lateral torsional, según corresponda. La lógica que justifica excluir estas verificaciones en estado límite se discute en el Artículo C6.10.3.2.3.

Estos requisitos asumen que los niveles de fuerza axial en el elemento son nulos o muy bajos. En cambio, en las secciones que también están sujetas a una fuerza axial concéntrica, P_u , debida a las cargas mayoradas, superior al diez por ciento de la resistencia axial mayorada del elemento, P_r , en el Estado Límite de Resistencia, la sección se debería verificar de acuerdo con los requisitos de los Artículos 6.8.2.3 o 6.9.2.2, según corresponda. De acuerdo con las ecuaciones dadas en estos artículos, cuando P_u es igual al diez por ciento de P_r , la resistencia a la flexión del elemento se reduce en un cinco por ciento. Por debajo de este nivel es razonable ignorar el efecto de la fuerza axial al diseñar el elemento.

6.11.6.2.2 Secciones en flexión positiva

Las secciones que satisfacen los siguientes requisitos deberán ser clasificadas como secciones compactas:

- las resistencias mínimas a la fluencia especificadas de las alas y del alma no son mayores que 485 MPa,
- el alma satisface el requisito del Artículo 6.11.2.1.2,
- la sección forma parte de un puente que satisface los requisitos del Artículo 6.11.2.3,
- el ala de la sección tipo cajón es totalmente efectiva como se especifica en el Artículo 6.11.1.1,

y

- la sección satisface el límite de esbeltez para el alma:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.11.6.2.2-1)$$

C6.11.6.2.2

Se permite que la resistencia nominal a la flexión de las secciones en flexión positiva en puentes que satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 y que también satisfacen los requisitos sobre grado del acero, esbeltez del alma y ductilidad sea mayor que el momento en primera fluencia de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.7. Por lo tanto, es más apropiado expresar la resistencia nominal a la flexión de estas secciones, conocidas como secciones compactas, en términos del momento. Para las secciones en flexión positiva que no satisfacen uno o más de estos requisitos, conocidas como secciones no compactas, no se permite que la resistencia nominal a la flexión sea mayor que el momento en primera fluencia y, por lo tanto, es más apropiado expresarla en términos de la tensión en el ala calculada elásticamente.

Por los motivos discutidos en el Artículo C6.10.6.2.2, las secciones compuestas en flexión positiva cuyas alas tienen una resistencia a la fluencia mayor que 485 MPa o cuyas almas no satisfacen el Artículo 6.11.2.1.2 o la Ecuación 1 se deben diseñar en el Estado Límite de

donde:

D_{cp} = profundidad del alma comprimida cuando se produce el momento plástico determinada como se especifica en el Artículo D6.3.2 (mm)

Las secciones compactas deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.11.7.1. Caso contrario, la sección se deberá considerar no compacta y deberá satisfacer los requisitos del Artículo 6.11.7.2.

Tanto las secciones compactas como las secciones no compactas deberán satisfacer los requisitos de ductilidad especificados en el Artículo 6.10.7.3.

6.11.6.2.3 Secciones en flexión negativa

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.11.8. No se deberán aplicar los requisitos del Apéndice A. No se deberá aplicar la redistribución del momento negativo debido a las cargas mayoradas en las secciones sobre pilas interiores de los elementos flexionales continuos usando los procedimientos especificados en el Apéndice B.

6.11.6.3 Corte

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.11.9.

6.11.6.4 Conectores de corte

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.10.4. También se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.11.10, según corresponda.

6.11.7 Resistencia a la flexión – Secciones en flexión positiva

Resistencia como secciones no compactas, tal como se especifica en el Artículo 6.11.7.2. Además, si la sección no forma parte de un puente que satisface las restricciones especificadas en el Artículo 6.11.2.3 o si el ala de la sección tipo cajón no es totalmente efectiva tal como se define en el Artículo 6.11.1.1, la sección se debe diseñar como una sección no compacta. Aún no se ha comprobado si estas secciones tienen capacidad para desarrollar una resistencia nominal a la flexión mayor que el momento en primera fluencia en presencia de corte por torsión de Saint-Venant y tensiones significativas debidas a la distorsión de la sección transversal.

Las secciones compactas en flexión positiva deben satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.7.3 para asegurar que el modo de falla sea dúctil. Las secciones no compactas también deben satisfacer el requisito de ductilidad especificado en el Artículo 6.10.7.3 para asegurar que el modo de falla sea dúctil. Satisfacer este requisito asegura un margen de seguridad adecuado contra el aplastamiento prematuro del tablero de hormigón en el caso de secciones en las cuales se utilizan aceros de 690 MPa y/o secciones que se utilizan en construcciones apuntaladas. Este requisito también es un límite fundamental para determinar si está o no permitido desprestigiar el pandeo flexional del alma al diseñar secciones compuestas en flexión positiva cuando el alma también satisface el Artículo 6.11.2.1.2, tal como se discute en el Artículo C6.10.1.9.1.

C6.11.6.2.3

Para las secciones en flexión negativa, los requisitos del Artículo 6.11.8 limitan la resistencia nominal a la flexión a un valor menor o igual que el momento en primera fluencia. En consecuencia, para estas secciones es conveniente expresar la resistencia nominal a la flexión en términos de la tensión en el ala calculada elásticamente.

Aún no se ha comprobado que los requisitos opcionales de los Apéndices A y B sean aplicables a las secciones tipo cajón. Por lo tanto, estos requisitos no se pueden utilizar para diseñar secciones tipo cajón.

6.11.7.1 Secciones compactas*6.11.7.1.1 Disposiciones generales*

En el Estado Límite de Resistencia la sección deberá satisfacer:

$$M_u \leq \phi_f M_n \quad (6.11.7.1.1-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

M_n = resistencia nominal a la flexión de la sección determinada como se especifica en el Artículo 6.11.7.1.2 (N-mm)

M_u = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal debido a las cargas mayoradas en la sección considerada (N-mm)

6.11.7.1.2 Resistencia nominal a la flexión

La resistencia nominal a la flexión de la sección se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.10.7.1.2, excepto que para los tramos continuos la resistencia nominal a la flexión siempre deberá estar sujeta a la limitación impuesta por la Ecuación 6.10.7.1.2-3.

6.11.7.2 Secciones no compactas*6.11.7.2.1 Disposiciones generales*

En el Estado Límite de Resistencia las alas de compresión deberán satisfacer:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc} \quad (6.11.7.2.1-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_{bu} = tensión longitudinal en el ala en la sección

C6.11.7.1.1

Para las secciones compuestas en flexión positiva no es necesario considerar la flexión lateral en las alas comprimidas de las secciones tipo omega invertida en el Estado Límite de Resistencia, ya que las alas tienen arriostramiento (apoyo lateral) continuo provisto por el tablero de hormigón. La flexión lateral tampoco constituye una consideración para las alas de las secciones tipo cajón.

C6.11.7.1.2

Las ecuaciones del Artículo 6.10.7.1.2 se discuten detalladamente en el Artículo C6.10.7.1.2.

Para las secciones tipo cajón siempre se debe utilizar la Ecuación 6.10.7.1.2-3 para determinar el límite de la resistencia nominal a la flexión de los tramos continuos. Los requisitos del Apéndice B, los cuales aseguran que las secciones sobre las pilas interiores tendrán suficiente ductilidad y una robustez tal que la redistribución de momentos provocada por la fluencia parcial dentro de las regiones de flexión positiva sea insignificante, en la actualidad no son aplicables a las secciones tipo cajón.

C6.11.7.2.1

Para las secciones no compactas, en el Estado Límite de Resistencia el ala de compresión debe satisfacer la Ecuación 1 y el ala de tracción debe satisfacer la Ecuación 2. Debido a que las alas tienen apoyo lateral continuo proporcionado por el tablero de hormigón, para las secciones compuestas en flexión positiva no es necesario considerar la flexión lateral en las alas de compresión en el Estado Límite de Resistencia. La flexión lateral tampoco constituye una consideración para el ala traccionada, que en este caso es siempre el ala de una sección tipo cajón.

Para las secciones no compactas utilizadas en construcciones apuntaladas, la tensión longitudinal en el

considerada calculada sin considerar la flexión lateral del ala ni el alabeo longitudinal, según corresponda (MPa)

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión del ala de compresión determinada como se especifica en el Artículo 6.11.7.2.2 (MPa)

El ala de tracción deberá satisfacer:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nt} \quad (6.11.7.2.1-2)$$

donde:

F_{nt} = resistencia nominal a la flexión del ala de tracción determinada como se especifica en el Artículo 6.11.7.2.2 (MPa)

Para las construcciones apuntaladas, la máxima tensión de compresión longitudinal en el tablero de hormigón en el Estado Límite de Resistencia, determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.1.1d, no deberá ser mayor que $0.6f'_c$.

6.11.7.2.2 Resistencia nominal a la flexión

La resistencia nominal a la flexión de las alas de compresión de las secciones tipo omega invertida se deberá tomar como:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (6.11.7.2.2-1)$$

donde:

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

La resistencia nominal a la flexión del ala de compresión de las secciones tipo cajón cerrado se deberá tomar como:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \Delta \quad (6.11.7.2.2-2)$$

donde:

$$\Delta = \sqrt{1 - 3 \left(\frac{f_v}{F_{yc}} \right)^2} \quad (6.11.7.2.2-3)$$

tablero de hormigón se limita a $0.6f'_c$ para garantizar el comportamiento lineal del hormigón, hipótesis que se asume en el cálculo de las tensiones en las alas de acero. En las construcciones no apuntaladas, la tensión en el hormigón al aproximarse a la primera fluencia de cualquiera de las alas de acero es en general significativamente menor que f'_c y por lo tanto en este caso no es necesario verificar la tensión del hormigón

C6.11.7.2.2

La resistencia nominal a la flexión de las secciones no compactas en flexión positiva se limita al momento en primera fluencia. Por este motivo la resistencia nominal a la flexión se expresa simplemente en función de la tensión en las alas. Para las secciones no compactas, se compara la tensión en cada ala debida a las cargas mayoradas calculada elásticamente, determinada de acuerdo con el Artículo 6.10.1.1.1a, contra la tensión de fluencia del ala multiplicada por los factores de reducción de la resistencia apropiados.

Para las alas de las secciones tipo cajón, cuando corresponda, también se debe considerar el efecto de la tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala. En el Artículo C6.11.1.1 se discute cómo calcular la tensión de corte torsional en las alas usando las Ecuaciones 4 o 7, según corresponda, debida a los pares torsores que se aplican separadamente a las secciones no compuesta y compuesta.

f_v = tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala debida a las cargas mayoradas en la sección considerada (MPa)

$$= \frac{T}{2A_o t_{fc}} \quad (6.11.7.2.2-4)$$

y donde:

A_o = área encerrada dentro de la sección tipo cajón (mm^2)

T = par torsor interno debido a las cargas mayoradas (N-mm)

La resistencia nominal a la flexión del ala de tracción de las secciones tipo cajón cerrado y omega invertida se deberá tomar como:

$$F_{nt} = R_h F_{yt} \Delta \quad (6.11.7.2.2-5)$$

donde:

$$\Delta = \sqrt{1 - 3 \left(\frac{f_v}{F_{yt}} \right)^2} \quad (6.11.7.2.2-6)$$

f_v = tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala debida a las cargas mayoradas en la sección considerada (MPa)

$$= \frac{T}{2A_o t_{ft}} \quad (6.11.7.2.2-7)$$

6.11.8 Resistencia a la flexión – Secciones en flexión negativa

6.11.8.1 Disposiciones generales

6.11.8.1.1 Alas de secciones tipo cajón solicitadas a compresión

C6.11.8.1.1

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nc} \quad (6.11.8.1.1-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

La Ecuación 1 asegura que las alas de las secciones tipo cajón solicitadas a compresión tengan suficiente resistencia con respecto al pandeo local de las alas. La flexión lateral y el pandeo lateral torsional no constituyen una consideración para las alas de las secciones tipo cajón.

En general, en las secciones sobre pilas interiores las alas inferiores de los cajones están sujetas a tensiones biaxiales debidas a la flexión respecto del eje mayor de la sección tipo cajón y la flexión respecto del eje mayor del diafragma interno sobre la placa de asiento. El ala también

f_{bu} = tensión longitudinal en el ala debida a las cargas mayoradas en la sección considerada calculada sin considerar el alabeo longitudinal (MPa)

F_{nc} = resistencia nominal a la flexión del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.11.8.2 (MPa)

está sujeta a tensiones de corte debidas al corte vertical del diafragma interno y, en aquellos casos en los cuales es necesario considerarlo, al corte por torsión de Saint-Venant. La flexión del diafragma interno sobre la placa de asiento puede ser particularmente significativa para los cajones apoyados sobre apoyos simples. Para los casos en los cuales se considera que las tensiones de corte y/o flexión del diafragma interno son significativas, se puede utilizar la siguiente ecuación para verificar el estado de tensiones combinado en el ala de la sección tipo cajón en el Estado Límite de Resistencia:

$$\sqrt{f_{bu}^2 - f_{bu}f_{by} + f_{by}^2 + 3(f_d + f_v)^2} \leq \phi_f R_b R_h F_{yc} \quad (\text{C6.11.8.1.1-1})$$

donde:

f_{by} = tensión en el ala provocada por las cargas mayoradas debidas a la flexión del diafragma interno respecto del eje mayor sobre la placa de asiento (MPa)

f_d = tensión de corte en el ala provocada por el corte vertical del diafragma interno debido a las cargas mayoradas (MPa)

f_v = tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala debida a las cargas mayoradas (MPa)

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

La Ecuación C1 representa la forma general del criterio de fluencia de Huber-von Mises-Hencky (*Ugural y Fenster 1975*).

Para una sección tipo cajón apoyada en dos apoyos, típicamente en la Ecuación C1 el valor de f_{by} es relativamente pequeño y con frecuencia se puede despreciar.

Al realizar esta verificación, en las secciones sobre una pila interior se puede considerar que el ala de la sección tipo cajón es efectiva con el diafragma interno. Se puede considerar efectivo con el diafragma interno un ancho de ala igual a 18 veces su espesor, lo cual es similar a la porción del alma o diafragma que se considera parte de la sección de columna efectiva para el diseño de los rigidizadores de apoyo. En consecuencia, la tensión de corte en el ala, f_d , provocada por el corte vertical del

diafragma interno debido a las cargas mayoradas se puede estimar como:

$$f_d = \frac{VQ}{I_{fc}} \quad (C6.11.8.1.1-2)$$

donde:

V = corte vertical en el diafragma interno provocado por la flexión más la torsión de Saint-Venant (N)

Q = primer momento de la mitad del área efectiva del ala de la sección tipo cajón respecto del eje neutro de la sección efectiva del diafragma interno (mm³)

I = momento de inercia de la sección efectiva del diafragma interno (mm⁴)

Cuando en el diafragma interno se provea una boca de acceso, al determinar las propiedades de la sección efectiva del diafragma se debería considerar el efecto de dicho orificio.

6.11.8.1.2 Alas con apoyo lateral continuo solicitadas a tracción

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$f_{bu} \leq \phi_f F_{nt} \quad (6.11.8.1.2-1)$$

donde:

F_{nt} = resistencia nominal a la flexión del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.11.8.3 (MPa)

6.11.8.2 Resistencia a la flexión de las alas de las secciones tipo cajón solicitadas a compresión

6.11.8.2.1 Disposiciones generales

La resistencia nominal a la flexión de las alas de las secciones tipo cajón solicitadas a compresión que no tienen rigidizadores de ala longitudinales se deberá determinar como se especifica en el Artículo 6.11.8.2.3.

6.11.8.2.2 Alas no rigidizadas

La resistencia nominal a la flexión del ala de compresión se deberá tomar como:

C6.11.8.1.2

Para las alas superiores de las secciones tipo omega invertida que tienen apoyo lateral continuo no es necesario considerar la flexión lateral de las alas. En general también se desprecian los cortes por torsión de Saint-Venant. Por el contrario, los cortes torsionales no se pueden despreciar en las alas de las secciones tipo cajón que tienen apoyo lateral continuo.

C6.11.8.2.2

La resistencia nominal a la flexión de las alas de compresión de las secciones tipo cajón se define considerando tres regiones diferentes en base a la esbeltez del ala. La esbeltez de las alas no rigidizadas se basa en el

- Si $\lambda_f \leq R_1 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}}$ entonces:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \Delta \quad (6.11.8.2.2-1)$$

- Si $R_1 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}} < \lambda_f \leq R_2 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}}$ entonces:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \left[\Delta - \left(\Delta - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{R_2 - \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{kE}}}{R_2 - R_1} \right) \right] \right\} \right] \quad (6.11.8.2.2-2)$$

- Si $\lambda_f > R_2 \sqrt{\frac{kE}{F_{yc}}}$ entonces:

$$F_{nc} = \frac{0.9 R_b k}{\left(\frac{b_{fc}}{t_{fc}} \right)^2} - \frac{R_b f_v^2 k}{0.9 E k_s^2} \left(\frac{b_{fc}}{t_{fc}} \right)^2 \quad (6.11.8.2.2-3)$$

donde:

λ_f = relación de esbeltez para el ala de compresión

$$= \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \quad (6.11.8.2.2-4)$$

$$\Delta = \sqrt{1 - 3 \left(\frac{f_v}{F_{yc}} \right)^2} \quad (6.11.8.2.2-5)$$

f_v = tensión de corte por torsión de Saint-Venant en el ala debida a las cargas mayoradas en la sección considerada (MPa)

$$= \frac{T}{2 A_o t_{fc}} \quad (6.11.8.2.2-6)$$

F_{yr} = menor valor entre la tensión del ala de compresión cuando se inicia la fluencia nominal, incluyendo los efectos de las tensiones residuales, y la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma (MPa)

$$= (\Delta - 0.4) F_{yc} \leq F_{yw} \quad (6.11.8.2.2-7)$$

ancho total entre las almas, b_{fc} .

En el caso de las placas más esbeltas, el comportamiento es determinado por el pandeo elástico representado por la clásica hipérbola de Euler. Para las alas sujetas a una combinación de tensión normal y tensión de corte torsional, para determinar la resistencia del ala en esta región se utiliza una curva de interacción no lineal. La curva de interacción relaciona las ecuaciones de pandeo elástico de Euler para una placa infinitamente larga bajo una tensión normal uniforme y bajo tensión de corte (*Timoshenko y Gere 1961; Culver 1972*). La Ecuación 3 calcula la resistencia al pandeo elástico del ala en base a esta curva de interacción. Johnston (1966) presenta una discusión general del problema de la reducción de las tensiones críticas de pandeo local debido a la presencia de corte torsional.

En el caso de las placas robustas (aquellas menos esbeltas), para una combinación de tensión normal y corte se puede lograr la fluencia total de la placa según el criterio de fluencia de von Mises (*Boresi et al. 1978*). Para estas placas la resistencia nominal a la flexión del ala es la definida por la Ecuación 1.

Entre las dos regiones descritas hay una región de transición que refleja el hecho de que la fluencia parcial debida a las tensiones residuales e imperfecciones iniciales no permite alcanzar la tensión de pandeo elástico. Como en ediciones anteriores de las Especificaciones, la resistencia nominal a la flexión del ala en esta región se define arbitrariamente en la Ecuación 2 mediante una curva sinusoidal. La Ecuación 2 fue originalmente desarrollada suponiendo un nivel de tensión residual igual a $0.4 F_{yc}$ (*Culver 1972*).

El coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme, k , y el coeficiente de pandeo por corte, k_s , suponen que los bordes de las alas están simplemente apoyados (*Timoshenko y Gere 1961*).

La esbeltez límite que define si se ha de utilizar la Ecuación 1 o la Ecuación 2 se basa en la constante R_1 dada por la Ecuación 8. El valor $R_1 \sqrt{kE/F_{yc}}$ se define como 0.6

veces la esbeltez del ala para la cual la tensión de pandeo elástico dada por la Ecuación 3 es igual a la resistencia para fluencia bajo una combinación de tensión normal y corte dada por la Ecuación 1. La esbeltez límite que define si se ha de utilizar la Ecuación 2 o la Ecuación 3 se basa en la constante R_2 dada por la Ecuación 9. El valor $R_2 \sqrt{kE/F_{yc}}$ se define como la esbeltez del ala para la cual la tensión de pandeo elástico dada por la Ecuación 3 es igual a F_{yc} , lo que expresa la Ecuación 7.

En el Artículo C6.11.1.1 se discute cómo calcular la tensión de corte torsional en el ala en base a la Ecuación 6 para el caso de pares torsores aplicados separadamente a las secciones no compuesta y compuesta.

El término R_b es un factor de reducción de la resistencia

k = coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme

$$= 4.0$$

k_s = coeficiente de pandeo de placas para tensión de corte

$$= 5.34$$

R_1 = constante que cuando se la multiplica por $\sqrt{kE/F_{yc}}$ da por resultado una relación de esbeltez igual a 0.6 veces la relación de esbeltez para la cual F_{nc} de la Ecuación 3 es igual a $R_b R_h F_{yc} \Delta$

$$= \frac{0.57}{\sqrt{\frac{1}{2} \left[\Delta + \sqrt{\Delta^2 + 4 \left(\frac{f_v}{F_{yc}} \right)^2 \left(\frac{k}{k_s} \right)^2} \right]}} \quad (6.11.8.2.2-8)$$

R_2 = constante que cuando se la multiplica por $\sqrt{kE/F_{yc}}$ da por resultado una relación de esbeltez para la cual F_{nc} de la Ecuación 3 es igual a F_{yr}

$$= \frac{1.23}{\sqrt{\frac{1}{1.2} \left[\frac{F_{yr}}{F_{yc}} + \sqrt{\left(\frac{F_{yr}}{F_{yc}} \right)^2 + 4 \left(\frac{f_v}{F_{yc}} \right)^2 \left(\frac{k}{k_s} \right)^2} \right]}} \quad (6.11.8.2.2-9)$$

donde:

b_{fc} = ancho del ala de compresión entre las almas (mm)

A_o = área encerrada dentro de una sección tipo cajón (mm²)

R_b = factor de balanceo de las cargas del alma determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.2

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

T = par torsor interno debido a las cargas mayoradas (N-mm)

postpandeo que toma en cuenta la reducción de la resistencia a la flexión en una sección provocada por el balanceo (reparto) de las tensiones de compresión de un alma esbelta y el consiguiente aumento de la tensión flexional dentro del ala de compresión. El factor R_h toma en cuenta la reducción de la contribución del alma a la resistencia nominal a la flexión cuando se inicia la fluencia en cualquier elemento de ala, debido a la fluencia previa del acero de menor resistencia en el alma de una sección híbrida. Los factores R_b y R_h se discuten en mayor profundidad en los Artículos C6.10.1.10.2 y C6.10.1.10.1, respectivamente.

6.11.8.2.3 Alas rigidizadas longitudinalmente

La resistencia nominal a la flexión del ala de compresión

C6.11.8.2.3

Cuando un ala no rigidizada de una sección tipo cajón

se deberá tomar igual a la resistencia nominal a la flexión del ala de compresión sin rigidizadores longitudinales, determinada como se especifica en el Artículo 6.11.8.2.2, con las siguientes consideraciones:

- b_{fc} se deberá reemplazar por w
- el coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme, k , se deberá tomar como:
- Si $n = 1$ entonces:

$$k = \left(\frac{8I_s}{wt_{fc}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.11.8.2.3-1)$$

- Si $n = 2$ entonces:

$$k = \left(\frac{0.894I_s}{wt_{fc}^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.11.8.2.3-2)$$

$$2.0 \leq k \leq 4.0 \text{ y:}$$

- el coeficiente de pandeo de placas para tensión de corte, k_s , se deberá tomar como:

$$k_s = \frac{5.34 + 2.84 \left(\frac{I_s}{wt_{fc}^3} \right)^{\frac{1}{3}}}{(n+1)^2} \leq 5.34 \quad (6.11.8.2.3-3)$$

donde:

I_s = momento de inercia de un único rigidizador longitudinal de ala respecto de un eje paralelo al ala y tomado en la base del rigidizador (mm^4)

n = número de rigidizadores de ala longitudinales igualmente espaciados

w = mayor valor entre el ancho del ala entre los rigidizadores de ala longitudinales y la distancia entre un alma y el rigidizador de ala longitudinal más próximo (mm)

Los rigidizadores longitudinales de las alas de compresión deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.11.11.2

no compuesta se vuelve tan esbelta que la resistencia nominal a la flexión del ala disminuye hasta un nivel que presenta problemas prácticos, a dicha ala se le pueden agregar rigidizadores longitudinales.

La resistencia nominal a la flexión de un ala de una sección tipo cajón rigidizada longitudinalmente se determina usando las mismas ecuaciones básicas especificadas en el Artículo 6.11.8.2.2 para alas no rigidizadas. En lugar de b_{fc} , en las ecuaciones se debe utilizar el ancho w . El coeficiente de pandeo por corte, k_s , para las placas rigidizadas a utilizar en las ecuaciones está dado por la Ecuación 3, la cual proviene de Culver (1972). El coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme, k , a utilizar en las ecuaciones depende de la rigidez de los rigidizadores longitudinales utilizados en las alas y se deriva de la Ecuación 6.11.11.2-2. El coeficiente k puede tomar cualquier valor comprendido entre 2.0 y 4.0. La Ecuación 1 se aplica para el caso de un solo rigidizador longitudinal ($n = 1$), mientras que la Ecuación 2 se aplica cuando se utilizan dos rigidizadores longitudinales ($n = 2$). Tal como se discute en el Artículo C6.11.11.2, a medida que aumenta el número de rigidizadores, el momento de inercia requerido de la Ecuación 6.11.11.2-2 para lograr el valor de k deseado comienza a aumentar dramáticamente y eventualmente se vuelve casi imposible desde el punto de vista práctico. Por lo tanto, para lograr la máxima economía, al diseñar secciones tipo cajón de las dimensiones habituales se recomienda no utilizar más de un rigidizador de ala longitudinal.

Observar que, debido a que las Ecuaciones 1 y 2 fueron derivadas directamente a partir de la Ecuación 6.11.11.2-2, esta ecuación es satisfecha automáticamente por el momento de inercia del rigidizador de ala longitudinal supuesto al determinar el valor de k mediante las Ecuaciones 1 o 2, según corresponda. En lugar de utilizar las Ecuaciones 1 o 2, otra opción consiste en asumir un valor de k comprendido entre 2.0 y 4.0 y a partir de dicho valor, usando la Ecuación 6.11.11.2-2, determinar el mínimo momento de inercia requerido para cada rigidizador de ala longitudinal con el cual se obtendrá el valor de k supuesto.

Si los rigidizadores de ala longitudinales son muy rígidos, k tendrá un valor cercano o igual a 4.0 y se obligará a que entre los rigidizadores se produzca el pandeo de las placas. Si se utilizan rigidizadores de menor rigidez, el valor de k será menor y por consiguiente también será menor el correspondiente valor de la resistencia nominal a la flexión del ala. En este caso la rigidez de los rigidizadores se reduce de manera tal que los rigidizadores permanezcan rectos pero que no formen líneas nodales para pandeo de placas. Las Ecuaciones 1 o 2, o alternativamente la Ecuación 6.11.11.2-2, le permiten al Ingeniero hallar la correspondencia entre el tamaño de rigidizador requerido y

la resistencia requerida del ala, en lugar de proveer siempre el mayor tamaño de rigidizador requerido para obtener un valor de k igual a 4.0.

Es recomendable interrumpir los rigidizadores de ala longitudinales en los sitios donde se realizan empalmes en obra, particularmente cuando no es necesario rigidizar el tramo que se encuentra del otro lado del empalme. Para lograr esto las placas de empalme utilizadas en las alas se deben diseñar de manera que permitan llevar el rigidizador hasta el borde libre del ala donde la tensión normal en el ala es nula. Se debería verificar la resistencia a la compresión del ala no rigidizada del otro lado del empalme. Caso contrario, si el rigidizador se debe interrumpir en una región sujeta a una tensión neta de tracción, determinada como se especifica en el Artículo 6.6.1.2.1, la terminación de la soldadura entre el rigidizador y el ala se debe verificar a la fatiga de acuerdo con el tipo de detalle correspondiente. Si fuera necesario prolongar el rigidizador más allá del empalme realizado en obra, se recomienda empalmar el rigidizador sobre el empalme realizado en obra.

6.11.8.3 Resistencia a la flexión del ala de tracción

La resistencia nominal a la flexión de las alas de tracción de las secciones tipo omega invertida se deberá tomar como:

$$F_{nt} = R_h F_{yt} \quad (6.11.8.3-1)$$

donde:

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

La resistencia nominal a la flexión del ala de tracción de las secciones tipo cajón cerrado se deberá determinar en base a la Ecuación 6.11.7.2.2-5.

6.11.9 Resistencia al corte

A menos que se especifique lo contrario, para determinar la resistencia al corte de un alma simple se deberán utilizar los requisitos del Artículo 6.10.9. Para el caso de las almas inclinadas, en el Artículo 6.10.9 D se deberá tomar como la profundidad de la placa de alma medida sobre la pendiente.

Para el caso de las almas inclinadas, cada alma se deberá diseñar para un corte, V_{ui} , debido a las cargas mayoradas tomado como:

$$V_{ui} = \frac{V_u}{\cos \theta} \quad (6.11.9-1)$$

C6.11.9

Para las secciones tipo cajón con almas inclinadas, las almas se deben diseñar para la componente del corte vertical en el plano del alma.

Generalmente las almas de las secciones tipo cajón se diseñan con almas de igual altura. Si el tablero es peraltado, puede que se rote el cajón para adaptarlo a la pendiente del tablero, lo cual generalmente se prefiere debido a que simplifica el proceso de fabricación manteniendo la simetría de las secciones de las vigas. El resultado de esto es que la inclinación de una de las almas es mayor de lo que hubiera sido si la viga no se hubiera rotado. El corte calculado en el alma debido a las cargas aplicadas verticalmente se debería ajustar para considerar este efecto.

donde:

V_u = corte vertical debido a las cargas mayoradas en un alma inclinada (N)

θ = ángulo de inclinación de la placa de alma respecto de la vertical (°)

Para las secciones tipo cajón simple, y para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son totalmente efectivas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1, V_u se deberá tomar como la sumatoria de los cortes por flexión y torsión de Saint-Venant.

Para las alas de las secciones tipo cajón, al verificar la Ecuación 6.10.9.3.2-1, b_{fc} o b_{ft} , según corresponda, se deberá tomar como un medio del ancho de ala entre las almas.

Los rigidizadores de alma deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.11.11.1

6.11.10 Conectores de corte

A menos que se especifique lo contrario, los conectores de corte se deberán diseñar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.10.

Se deberán proveer conectores de corte en las regiones de flexión negativa.

Para las secciones tipo cajón simple y para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son totalmente efectivas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1, los conectores de corte se deberán diseñar para la sumatoria de los cortes por flexión y torsión de Saint-Venant. El rango de corte horizontal de fatiga por unidad de longitud, V_{sr} , para un ala superior de una viga tipo omega invertida se deberá calcular para el alma en la cual los cortes por flexión y torsión son aditivos. La separación de los conectores de corte resultante también se deberá utilizar para la otra ala superior.

Para verificar que el número de conectores de corte resultante satisfaga el Estado Límite de Resistencia, al determinar P mediante las Ecuaciones 6.10.10.4.2-2, 6.10.10.4.2-3, 6.10.10.4.2-5 y 6.10.10.4.2-6 se deberá utilizar el área de la sección transversal de la sección tipo cajón de acero bajo consideración más el área del tablero de hormigón asociado con dicha sección tipo cajón.

En las alas de las secciones tipo cajón compuestas los conectores de corte se deberán distribuir uniformemente en el ancho del ala. La máxima separación transversal, s_t , entre los conectores de corte de las alas de las secciones tipo cajón compuestas deberá satisfacer el siguiente requisito:

Al diseñar las almas de las secciones tipo cajón específicamente citadas en este artículo es necesario considerar el corte debido a la torsión de Saint-Venant. Debido a que en ambas alas el corte torsional tiene signo contrario, en una misma sección el corte total en una de las almas es mayor que en la otra. Por motivos prácticos ambas alas se pueden diseñar para el corte crítico.

Aunque el corte y las tensiones longitudinales en las almas debidos al alabeo no son nulos, típicamente estas solicitaciones son bastante pequeñas y se pueden ignorar al diseñar las almas.

Para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 donde para los momentos se utiliza un factor de distribución de las sobrecargas vivas, para calcular el corte vertical debido a la sobrecarga viva en cada alma se debería utilizar la mitad del factor de distribución de los momentos.

C6.11.10

En las regiones de flexión negativa se deben colocar conectores de corte para resistir el corte torsional que existe a lo largo de la totalidad del tramo en todos los tipos de secciones tipo cajón compuestas. Además, todos los prototipos y puentes que se estudiaron al desarrollar originalmente los requisitos sobre distribución de las sobrecargas vivas en las secciones tipo cajón tenían conectores de corte en toda la región de flexión negativa.

Típicamente los máximos cortes flexionales y torsionales no son producidos por cargas simultáneas. Sin embargo, la interacción entre la flexión y la torsión que producen las cargas móviles es tan compleja que no resulta práctico considerarla. En lugar de ello, para aquellos casos en los cuales es necesario considerar el corte torsional, estos requisitos permiten calcular el rango de corte horizontal de fatiga en base a la Ecuación 6.10.10.1.2-2 usando la sumatoria de los máximos cortes flexionales y torsionales en el alma en la cual ambos cortes son aditivos. El rango de corte y la separación resultante se deberían calcular usando un medio del momento de inercia de la sección tipo cajón compuesta. El ala superior sobre la otra alma, o la otra mitad del ala en el caso de una sección tipo cajón cerrado, debería contener el mismo número de conectores de corte.

La mejor manera de distribuir los conectores de corte en el ancho de las alas de las secciones tipo cajón para asegurar que la totalidad del ala actúe de manera compuesta con el tablero de hormigón consiste en hacerlo uniformemente. Para ayudar a evitar el pandeo local de la placa de ala cuando ésta está solicitada a compresión, la

$$\frac{s_t}{t_f} \sqrt{\frac{F_{yf}}{kE}} \leq R_l \quad (6.11.10-1)$$

donde:

k = coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme determinado como se especifica en el Artículo 6.11.8.2

R_l = relación de esbeltez límite para el ala de la sección tipo cajón determinada mediante la Ecuación 6.11.8.2.2-8

Para las alas de las secciones tipo cajón compuestas en el Estado Límite de Fatiga, V_{sr} de la Ecuación 6.10.10.1.2-1 se deberá determinar como la suma vectorial del rango de corte horizontal de fatiga dado por la Ecuación 6.10.10.1.2-2 y el rango de corte torsional de fatiga en el tablero de hormigón. El número de conectores de corte requerido para satisfacer el Estado Límite de Resistencia se deberá determinar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.10.4. Además, para cada conector de corte individual la suma vectorial de los cortes horizontales y torsionales debidos a las cargas mayoradas en el tablero de hormigón no deberá ser mayor que el valor de Q_r determinado en base a la Ecuación 6.10.10.4.1-1.

6.11.11 Rigidizadores

6.11.11.1 Rigidizadores de alma

Los rigidizadores de alma transversales intermedios se deberán diseñar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.11.1.

Los rigidizadores de alma longitudinales se deberán diseñar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.11.3.

A menos que se especifique lo contrario, los rigidizadores de apoyo se deberán diseñar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.11.2. Los rigidizadores de apoyo se deberán unir a los diafragmas antes que a las almas inclinadas. En el caso de los rigidizadores de apoyo unidos a un diafragma, los requisitos del Artículo 6.10.11.2.4b se deberán aplicar al diafragma antes que al alma. En los apoyos de expansión, los rigidizadores de apoyo y diafragmas se deberán diseñar considerando la excentricidad debida a los movimientos de origen térmico.

6.11.11.2 Rigidizadores longitudinales de las alas de compresión

Los rigidizadores longitudinales de las alas de compresión de las secciones tipo cajón deberán estar

separación transversal de los conectores de corte debe satisfacer la Ecuación 1. El corte torsional o rango de corte resistido por el tablero de hormigón se puede determinar multiplicando el corte torsional o rango de corte que actúa en la parte superior de la sección tipo cajón compuesta por la relación entre el espesor del tablero de hormigón transformado y el espesor total del ala superior más el tablero transformado. El tablero de hormigón debería tener armadura transversal adecuada para resistir este corte torsional.

C6.11.11.1

Cuando se utilizan almas inclinadas, los rigidizadores de apoyo se deberán unir ya sea a un diafragma interno o a un diafragma externo y no a las almas, de manera que los rigidizadores de apoyo sean perpendiculares a la placa de asiento. Los movimientos térmicos del puente pueden provocar que el diafragma sea excéntrico con respecto a los apoyos. Esta excentricidad debe ser tomada en cuenta en el diseño del diafragma y los rigidizadores de apoyo. En general los efectos de la excentricidad son más críticos cuando los rigidizadores de apoyo se unen a los diafragmas. Los efectos de la excentricidad se pueden considerar diseñando el rigidizador de apoyo como si se tratara de una viga-columna conforme a los requisitos de los Artículos 6.10.11.2 y 6.9.2.2.

C6.11.11.2

La intención de la Ecuación 1 es evitar el pandeo local de los elementos salientes de los rigidizadores

igualmente espaciados sobre el ancho del ala. La resistencia a la fluencia mínima especificada de los rigidizadores no deberá ser menor que la resistencia a la fluencia mínima especificada del ala a la cual están unidos.

El ancho saliente, b_ℓ , del rigidizador deberá satisfacer:

$$b_\ell \leq 0.48t_s \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (6.11.11.2-1)$$

donde:

b_ℓ = espesor del rigidizador (mm)

El momento de inercia, I_ℓ , de cada rigidizador respecto de un eje paralelo al ala y tomado en la base del rigidizador deberá satisfacer:

$$I_\ell \geq \Psi w t_{fc}^3 \quad (6.11.11.2-2)$$

donde:

$$\Psi = 0.125 k^3 \text{ para } n = 1$$

$$= 1.120 k^3 \text{ para } n = 2$$

k = coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme

$$2.0 \leq k \leq 4.0$$

n = número de rigidizadores de ala longitudinales igualmente espaciados

w = mayor valor entre el ancho del ala entre rigidizadores de ala longitudinales y la distancia entre un alma y el rigidizador de ala longitudinal más próximo (mm)

longitudinales de las alas.

La Ecuación 2, utilizada para calcular el momento de inercia requerido para el rigidizador longitudinal, I_ℓ , es una expresión aproximada que dentro de su rango de aplicabilidad permite obtener para la tensión crítica de pandeo del ala valores próximos a los que se obtienen usando las ecuaciones de equilibrio elástico, las cuales son exactas pero difíciles de aplicar (*Timoshenko y Gere 1961*). El tamaño requerido para el rigidizador aumenta a medida que el panel se vuelve más pequeño, ya que la resistencia al pandeo de los paneles aumenta a medida que los paneles se vuelven más pequeños.

El momento de inercia real del rigidizador longitudinal, I_s , que se usa para determinar el coeficiente de pandeo de placas para tensión normal uniforme, k , con las Ecuaciones 6.11.8.2.3-1 o 6.11.8.2.3-2, según corresponda, satisface automáticamente la Ecuación 2 cuando se utiliza dicho valor de k , ya que las ecuaciones para k han sido desarrolladas directamente a partir de la Ecuación 2. Alternativamente, en lugar de utilizar las Ecuaciones 6.11.8.2.3-1 o 6.11.8.2.3-2 se puede asumir un valor de k comprendido entre 2.0 y 4.0. Luego el mínimo momento de inercia requerido para cada rigidizador de ala longitudinal con el cual se obtiene el valor de k supuesto se puede determinar a partir de la Ecuación 2.

Cuando sea necesario utilizarlos, se recomienda no utilizar más de un rigidizador de ala longitudinal. Con un solo rigidizador se logra la máxima economía en las secciones tipo cajón de las dimensiones habitualmente utilizadas. La Ecuación 2 supone que la placa de ala y los rigidizadores son infinitamente largos e ignora el efecto de cualquier arriostramiento o rigidización transversal. Por lo tanto, cuando n es mayor que 1, el momento de inercia requerido calculado mediante la Ecuación 2 comienza a aumentar dramáticamente. Cuando n es mayor que 2, valor para el cual Ψ es igual a $0.07 k^3 n^4$, el momento de inercia requerido calculado mediante la Ecuación 2 se vuelve casi imposible desde el punto de vista práctico.

Para aquellos raros casos en los cuales se requiere un ala excepcionalmente ancha y puede ser necesario que n sea mayor que 2, se sugiere considerar la utilización de rigidizadores de alma transversales para así reducir el tamaño de los rigidizadores longitudinales a un valor más práctico. También se podría considerar el uso de rigidizadores de ala transversales para aquellos casos en los cuales n es igual a 2 si se requiere un valor de k mayor que aproximadamente 2.5 y se desea reducir el tamaño requerido de los rigidizadores longitudinales con respecto a lo indicado por la Ecuación 2. La resistencia a la fluencia mínima especificada de los rigidizadores de ala transversales no debería ser menor que la resistencia mínima a la fluencia especificada del ala de la sección tipo cajón. Los perfiles estructurales en forma de Te se pueden

usar como rigidizadores de ala transversales, y/o como puntal inferior, dentro del arriostramiento transversal interno del cajón y satisfaciendo los requisitos del Artículo 6.7.4.3, y pueden trabajar como rigidizadores de ala transversales si también satisfacen el requisito de rigidez dado por la Ecuación C4. En cualquier caso, los rigidizadores transversales de las alas se deberían unir a los rigidizadores longitudinales de las alas mediante bulones. La unión a cada rigidizador longitudinal se debería diseñar para resistir la siguiente fuerza vertical:

$$F_s = \frac{\phi_f F_{ys} S_s}{nb_{fc}} \quad (C6.11.11.2-1)$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

F_{ys} = mínima resistencia a la fluencia especificada del rigidizador de ala transversal (MPa)

S_s = módulo resistente del rigidizador de ala transversal (mm^3)

Los perfiles estructurales individuales en forma de Te que funcionan como rigidizadores de ala transversales también se deberían unir a las almas de la sección tipo cajón. La unión de los rigidizadores de ala transversales a cada alma se debería diseñar para resistir la siguiente fuerza vertical:

$$F_w = \frac{\phi_f F_{ys} S_s}{2b_{fc}} \quad (C6.11.11.2-2)$$

Para los casos excepcionales en los cuales se estima que es necesario utilizar rigidizadores de ala transversales, al determinar el momento de inercia requerido para los rigidizadores de ala longitudinales en la Ecuación 2 la constante ψ se debe tomar igual a 8.0. En este caso preferentemente n no debería ser mayor que cinco. Para que los rigidizadores transversales puedan ser considerados efectivos, la separación longitudinal de los mismos no debería ser mayor que tres veces el ancho total del ala de la sección tipo cajón, b_{fc} . En lugar de utilizar el valor de k determinado mediante las Ecuaciones 6.11.8.2.3-1 o 6.11.8.2.3-2, el coeficiente de pandeo de placas, k , para tensión normal uniforme a utilizar en las Ecuaciones del Artículo 6.11.8.2.2 se puede tomar de la siguiente manera:

$$k = \frac{\left[1 + \left(a/b_{fc}\right)^2\right]^2 + 87.3}{(n+1)^2 \left(a/b_{fc}\right)^2 \left[1 + 0.1(n+1)\right]} \leq 4.0 \quad (\text{C6.11.11.2-3})$$

donde:

a = separación longitudinal de los rigidizadores de ala transversales (mm)

Si la separación entre rigidizadores de ala transversales es menor o igual que $4w$, de acuerdo con la Ecuación C3 se obtendrá un valor de k aproximadamente igual a 4.0 mientras n no sea mayor que 5. Cuando se utiliza el valor de k calculado mediante la Ecuación C3, el momento de inercia, I_t , de cada uno de los rigidizadores de ala transversales respecto de un eje que pasa por su baricentro y es paralelo a su borde inferior deberá satisfacer:

$$I_t \geq 0.1(n+1)^3 w^3 \frac{f_s}{E} \frac{A_f}{a} \quad (\text{C6.11.11.2-4})$$

donde:

A_f = área del ala de una sección tipo cajón, incluyendo los rigidizadores de ala longitudinales (mm²)

f_s = mayor de las tensiones longitudinales en el ala debidas a las cargas mayoradas en los paneles a ambos lados del rigidizador de ala transversal considerado (MPa)

Los rigidizadores de ala longitudinales preferidos son los perfiles estructurales en forma de Te, ya que estos elementos poseen una elevada relación entre su rigidez y su sección transversal. Los perfiles Te también minimizan el potencial de pandeo lateral torsional de los rigidizadores. Debido a que los rigidizadores de ala longitudinales son elementos portantes primarios, la resistencia a la fluencia mínima especificada de los rigidizadores no debe ser menor que la resistencia a la fluencia mínima especificada del ala a la cual están unidos. Puede que no sea posible conseguir perfiles Te de acero de los grados superiores. En estos casos las Te se pueden fabricar a partir de placas o bien se puede considerar el uso de barras.

Los rigidizadores de ala longitudinales deberían mantener su continuidad a través de los diafragmas internos. Se debería considerar la posibilidad de unir los rigidizadores de ala longitudinales a los diafragmas internos. Una manera práctica de unir los perfiles en forma de Te a los diafragmas es usando un par de ángulos metálicos.

Tal como se discutió en el Artículo C6.7.4.3, para los

casos en los cuales se considera que las torsiones de Saint-Venant son significativas, como parte del sistema de arriostramiento interno se debería considerar proveer elementos de arriostramiento transversal inferiores de manera de controlar la distorsión del ala de la sección tipo cajón. Cuando se utilizan rigidizadores de ala longitudinales, el elemento transversal se debe unir a los rigidizadores longitudinales usando bulones. Tal como se discutió anteriormente en este mismo artículo, en el raro caso de un ala excepcionalmente ancha también puede ser necesario utilizar elementos de arriostramiento inferiores y/o rigidizadores de ala transversales individuales unidos a los rigidizadores de ala longitudinales. En los demás casos no es necesario colocar rigidización transversal adicional para las alas de las secciones tipo cajón. Se debe destacar que, cuando se los utiliza, no es necesario que los elementos de arriostramiento transversal inferiores y sus uniones satisfagan los requisitos de las Ecuaciones C1, C2 y C4, a menos que para diseñar el ala de la sección tipo cajón se utilice el valor de k determinado mediante la Ecuación C3.

6.12 ELEMENTOS VARIOS SOLICITADOS A FLEXIÓN

6.12.1 Disposiciones generales

6.12.1.1 Alcance

Los requisitos de este artículo se deberán aplicar a:

- Elementos no compuestos en forma de H solicitados a flexión respecto de cualquiera de los ejes de la sección transversal;
- Elementos no compuestos en forma de cajón;
- Tubos de sección circular no compuesta;
- Perfiles U, perfiles L, perfiles Te y barras;
- Perfiles laminados revestidos de hormigón; y
- Tubos compuestos.

6.12.1.2 Estado Límite de Resistencia

6.12.1.2.1 Flexión

La resistencia a la flexión mayorada, M_r , se deberá tomar como:

$$M_r = \phi_f M_n \quad (6.12.1.2.1-1)$$

donde:

C6.12.1.1

Este artículo se ocupa de los elementos compuestos o no compuestos pequeños, laminados o armados que se utilizan fundamentalmente en las celosías y marcos o en aplicaciones varias y que están sujetos a flexión, a menudo en combinación con cargas axiales.

M_n = resistencia nominal a la flexión especificada en los Artículos 6.12.2.2 y 6.12.2.3 para elementos no compuestos y compuestos, respectivamente (N-mm)

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

6.12.1.2.2 Combinación de flexión y carga axial

Se deberán aplicar las ecuaciones de interacción especificadas en el Artículo 6.8.2.3 para combinación de tracción axial y flexión o las ecuaciones de interacción especificadas en el Artículo 6.9.2.2 para combinación de compresión axial y flexión.

6.12.1.2.3 Corte

La resistencia al corte mayorada, V_r , se deberá tomar como:

$$V_r = \phi_v V_n \quad (6.12.1.2.3-1)$$

donde:

V_n = resistencia nominal al corte especificada en los Artículos 6.10.9.2 y 6.12.3 para almas de elementos no compuestos y compuestos, respectivamente (N)

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

6.12.2 Resistencia nominal a la flexión

6.12.2.1 Disposiciones generales

Los requisitos sobre pandeo lateral torsional no se aplican a los elementos compuestos, elementos en forma de cajón no compuestos, elementos de sección en forma de H flexionados respecto de un eje paralelo al alma, ni a los tubos de sección circular.

6.12.2.2 Elementos no compuestos

6.12.2.2.1 Elementos de sección en forma de doble Te y H

Los requisitos de este artículo se aplican a los elementos de sección en forma de doble Te y H y a los elementos que consisten en dos alas en forma de U conectadas mediante una placa de alma.

Para flexión respecto de un eje perpendicular al alma se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.

La resistencia nominal a la flexión para flexión respecto

6.12.2.2.1

Las ecuaciones 1 y 2 fueron tomadas del Apéndice F de AISC (1999), salvo que la esbeltez del ala λ_{rf} correspondiente a la transición de pandeo local inelástico a elástico del ala se basa siempre en el momento de fluencia en flexión respecto del eje débil, $F_{yf}S_y$. AISC (1999) utiliza $F_{yf}S_y$ como el momento correspondiente a la transición de pandeo local inelástico a elástico, pero luego especifica λ_{rf}

de un eje paralelo al alma se deberá tomar como:

- Si $\lambda_f \leq \lambda_{pf}$, entonces:

$$M_n = M_p \quad (6.12.2.2.1-1)$$

- Si $\lambda_{pf} < \lambda_f \leq \lambda_{rf}$, entonces:

$$M_n = \left[1 - \left(1 - \frac{S_y}{Z_y} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{0.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yf}}}} \right) \right] F_{yf} Z_y \quad (6.12.2.2.1-2)$$

donde:

λ_f = relación de esbeltez para el ala

$$= \frac{b_f}{2t_f} \quad (6.12.2.2.1-3)$$

λ_{pf} = relación de esbeltez límite para un ala compacta

$$= 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yf}}} \quad (6.12.2.2.1-4)$$

λ_{rf} = relación de esbeltez límite para un ala no compacta

$$= 0.83 \sqrt{\frac{E}{F_{yf}}} \quad (6.12.2.2.1-5)$$

y donde:

F_{yf} = mínima resistencia a la fluencia especificada del ala de menor resistencia (MPa)

M_p = momento plástico respecto del eje paralelo al alma (N-mm)

S_y = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje paralelo al alma (mm³)

Z_y = módulo resistente plástico de la sección respecto del eje paralelo al alma (mm³)

6.12.2.2.2 Elementos de sección tipo cajón

La resistencia nominal a la flexión se deberá tomar como:

en base a un nivel de momento menor. El enfoque adoptado en estos requisitos se debe interpretar como una forma corregida de las ecuaciones de AISC (1999) y es conservador con respecto a las ecuaciones tal como aparecen en AISC (1999). Conservadoramente, el momento de fluencia $F_{yf}S_y$ se puede tomar como el momento en la transición de pandeo local inelástico a elástico del ala debido a los efectos beneficiosos del gradiente de tensiones en el ala asociado con la flexión respecto del eje débil.

Para los elementos de sección en forma de H, $M_p = 1.5 F_y S$, siendo S el módulo resistente elástico de la sección con respecto de este eje.

C6.12.2.2.2

En general los elementos de sección tipo cajón tienen una elevada resistencia a la torsión lateral y por lo tanto estos efectos se ignoran. Sin embargo, en el caso de los elementos de celosías y en otras situaciones en las cuales puede haber grandes longitudes no arriostradas es posible

$$M_n = F_y S \left[1 - \frac{0.064 F_y S \ell}{AE} \left(\frac{\sum \left(\frac{b}{t} \right)}{I_y} \right)^{0.5} \right] \quad (6.12.2.2.2-1)$$

donde:

S = módulo resistente respecto del eje de flexión (mm^3)

A = área encerrada por los ejes de las placas que forman el cajón (mm^2)

ℓ = longitud no arriostrada (mm)

I_y = momento de inercia respecto de un eje perpendicular al eje de flexión (mm^4)

b = distancia libre entre placas (mm)

t = espesor de las placas (mm)

que despreciar estos efectos no sea adecuado. La Ecuación 1 se desarrolló a partir del momento de pandeo lateral torsional elástico, M_{CR} , dado por la siguiente expresión:

$$M_{CR} = \frac{\pi}{\ell} \sqrt{EI_y GJ} \quad (C6.12.2.2.2-1)$$

donde:

$$G = 0.385E, \text{ y} \quad (C6.12.2.2.2-2)$$

$$J = \frac{4A^2}{\sum \frac{b}{t}} \quad (C6.12.2.2.2-3)$$

Reemplazando las Ecuaciones C2 y C3 en la Ecuación C1:

$$M_{CR} = \frac{3.90EA}{\ell} \sqrt{\frac{I_y}{\sum \frac{b}{t}}} \quad (C6.12.2.2.2-4)$$

Se supuso que el pandeo sería en el rango inelástico, por lo que para estimar el efecto del pandeo inelástico se utilizó la ecuación para columnas circulares de hormigón armado:

$$M_I = F_y S \left[1 - \frac{F_y S}{4M_{CR}} \right] \quad (C6.12.2.2.2-5)$$

Reemplazando la Ecuación C4 en la Ecuación C5 se obtiene la Ecuación C1.

6.12.2.2.3 Tubos de sección circular

La resistencia nominal a la flexión de los tubos de sección circular no compuesta se deberá tomar como:

- Si $\frac{D}{t} < 2\sqrt{\frac{E}{F_y}}$, entonces:

$$M_n = M_p \quad (6.12.2.2.3-1)$$

- Si $2\sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{D}{t} \leq 8.8\sqrt{\frac{E}{F_y}}$, entonces:

$$M_n = M_y \quad (6.12.2.2.3-2)$$

donde:

C6.12.2.2.3

Las Ecuaciones 1 y 2 representan una función escalonada para determinar la resistencia nominal a la flexión. Al momento de redactar el presente documento ninguna ecuación de transición ha sido aceptada.

D = diámetro exterior (mm)

t = espesor de la pared (mm)

6.12.2.2.4 Perfiles U, perfiles L, perfiles Te y barras

Para los perfiles L, los perfiles Te, los perfiles U y las barras, la resistencia nominal a la flexión deberá ser el menor valor según las limitaciones impuestas por:

- La fluencia
- El pandeo lateral torsional, o
- El pandeo local de los elementos

6.12.2.3 Elementos compuestos

6.12.2.3.1 Perfiles revestidos de hormigón

Para los perfiles revestidos de hormigón que satisfacen los requisitos del Artículo 6.9.5.2.3, la resistencia nominal a la flexión de los perfiles revestidos en hormigón sujetos a flexión sin compresión se deberá tomar como el menor valor entre:

$$M_n = M_{ps}, \text{ o} \quad (6.12.2.3.1-1)$$

$$M_n = M_{yc} \quad (6.12.2.3.1-2)$$

Para los propósitos del Artículo 6.9.2.2, la resistencia nominal a la flexión de los perfiles revestidos en hormigón sujetos a compresión y flexión se deberá tomar como:

- Si $\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.3$, entonces:

$$M_n = ZF_y + \frac{(d-2c)A_r F_{yr}}{3} + \left(\frac{d}{2} - \frac{A_w F_y}{1.7 f_c b} \right) A_w F_y \quad (6.12.2.3.1-3)$$

- Si $0.0 < \left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right) < 0.3$, entonces:

M_n se deberá determinar interpolando linealmente entre el valor de M_n dado por las Ecuaciones 1 o 2 para $P_u = 0$ y el valor de M_n dado por la Ecuación 3 para $(P_u/\phi_c P_n) \geq 0.3$

donde:

P_u = fuerza de compresión axial debida a las cargas mayoradas (N)

C6.12.2.2.4

Estos tipos de elementos, los cuales generalmente no se utilizan trabajando a flexión, son cubiertos por AISC (1999).

C6.12.2.3.1

El comportamiento de los perfiles revestidos de hormigón y los tubos rellenos de hormigón cubiertos por el presente artículo se discute exhaustivamente en Galambos (1998) y AISC (1999). El uso más frecuente de este tipo de elementos es como columnas o vigas-columnas.

La ecuación para M_n cuando $(P_u/\phi_c P_n) \geq 0.3$ es una ecuación aproximada para la resistencia al momento plástico que combina las resistencias a la flexión del perfil de acero, las barras de armadura y el hormigón armado. Estas resistencias se definen en el primero, el segundo y el tercer término de la ecuación respectivamente (Galambos 1998). Esta ecuación ha sido verificada mediante numerosos ensayos (Galambos y Chapuis 1980).

No hay datos de ensayo disponibles respecto de la pérdida de adherencia en las vigas-columnas compuestas. Sin embargo, considerando la fisuración por tracción del hormigón, $(P_u/\phi_c P_n) = 0.3$ pareciera ser un límite conservador (AISC 1999). Se asume que cuando $(P_u/\phi_c P_n)$ es menor que 0.3 la resistencia nominal a la flexión se reduce por debajo de la resistencia al momento plástico de la sección compuesta dada por la Ecuación 3.

Cuando no hay ninguna carga axial, aún en el caso de revestimiento total, se asume que la adherencia solamente es capaz de desarrollar la resistencia al momento plástico de la sección de acero o la resistencia al momento de fluencia de la sección compuesta, cualquiera sea el valor que resulte menor.

P_n = resistencia nominal a la compresión especificada en el Artículo 6.9.5.1 (N)

ϕ_c = factor de resistencia para compresión axial especificado en el Artículo 6.5.4.2

M_{ps} = momento plástico de la sección de acero (N-mm)

M_{yc} = momento de fluencia de la sección compuesta determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

Z = módulo resistente plástico de la sección de acero respecto del eje de flexión (mm^3)

A_w = área del alma de la sección de acero (mm^2)

f'_c = mínima resistencia a la compresión especificada del hormigón a 28 días (MPa)

A_r = área de la armadura longitudinal (mm^2)

c = distancia entre el centro de la armadura longitudinal y la cara más próxima del elemento en el plano de flexión (mm)

d = profundidad del elemento en el plano de flexión (mm)

b = ancho del elemento perpendicular al plano de flexión (mm)

F_{yr} = mínima resistencia a la flexión especificada de la armadura longitudinal (MPa)

6.12.2.3.2 Tubos rellenos de hormigón

La resistencia nominal a la flexión de los tubos rellenos de hormigón que satisfacen las limitaciones especificadas en el Artículo 6.9.5.2 se puede tomar como:

- Si $\frac{D}{t} < 2.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, entonces:

$$M_n = M_{ps} \quad (6.12.2.3.2-1)$$

- Si $2.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{D}{t} \leq 8.8 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, entonces:

C6.12.2.3.2

Las Ecuaciones 1 y 2 representan una función escalonada para determinar la resistencia nominal a la flexión. Al momento de redactar el presente documento ninguna ecuación de transición ha sido aceptada.

$$M_n = M_{yc} \quad (6.12.2.3.2-2)$$

6.12.3 Resistencia nominal al corte de los elementos compuestos

6.12.3.1 Perfiles revestidos de hormigón

La resistencia nominal al corte se puede tomar como:

$$V_n = 0.58F_{yw}D t_w + \frac{F_{yr}A_v(d-c)}{s} \quad (6.12.3.1-1)$$

donde:

F_{yw} = mínima resistencia a la fluencia especificada del alma del perfil de acero (MPa)

F_{yr} = mínima resistencia a la fluencia especificada de la armadura transversal (MPa)

D = profundidad de alma del perfil de acero (mm)

t_w = espesor del alma o las almas del perfil de acero (mm)

A_v = área de las barras de armadura transversal que interceptan una fisura por corte diagonal (mm²)

s = separación longitudinal de la armadura transversal (mm)

d = profundidad del elemento en el plano de corte (mm)

c = distancia entre el centro de la armadura longitudinal y la cara más próxima del elemento en el plano de flexión (mm)

6.12.3.2 Tubos rellenos de hormigón

6.12.3.2.1 Tubos de sección rectangular

La resistencia nominal al corte se puede tomar como:

$$V_n = 1.16D t_w F_y \quad (6.12.3.2.1-1)$$

donde:

D = profundidad de alma del tubo (mm)

t_w = espesor de la pared del tubo (mm)

6.12.3.2.2 Tubos de sección circular

La resistencia nominal al corte se puede tomar como:

V_n = resistencia nominal al corte del tubo de acero considerado en forma independiente (N)

6.13 UNIONES Y EMPALMES

6.13.1 Disposiciones generales

A menos que se especifique lo contrario, las uniones y empalmes para los elementos principales se deberán diseñar en el Estado Límite de Resistencia para no menos que el mayor valor entre:

- El promedio de la tensión inducida por el momento flector, el corte o la fuerza axial debidos a las cargas mayoradas en el punto de empalme o unión y la resistencia mayorada a la flexión, corte o carga axial del componente o elemento en el mismo punto, y
- 75 por ciento de la resistencia mayorada a la flexión, corte o carga axial del componente o elemento.

Las uniones en los extremos de los diafragmas, marcos transversales, arriostramientos laterales, vigas longitudinales o vigas de tablero de los elementos rectos solicitados a flexión se deberán diseñar para las cargas mayoradas que actúan en los elementos.

Siempre que sea posible, las uniones deberían ser simétricas respecto del eje de los elementos. Excepto en el caso de las barras de enlace y barandas, las uniones no deberán contener menos de dos bulones o una soldadura equivalente. Los elementos, incluyendo las riostras, se deberían conectar de manera que sus ejes de gravedad se intersequen en un punto. Se deberían evitar las uniones excéntricas. Cuando no sea posible evitar el uso de uniones excéntricas, los elementos y uniones se deberán dimensionar para los efectos combinados de corte y momento debidos a la excentricidad.

En el caso de las uniones que transmiten todo el corte en el extremo del elemento, la sección bruta se deberá tomar como la sección bruta de los elementos conectados.

El espesor de los perfiles angulares usados en las uniones de extremo de las vigas longitudinales, vigas de tablero y vigas compuestas no debería ser menor que 10 mm. Las uniones de los extremos de las vigas longitudinales, vigas de tablero y vigas compuestas se deberían realizar usando dos perfiles angulares. Las ménsulas o perfiles especiales que se utilicen para proveer apoyo durante el montaje no pueden ser considerados al determinar el número de conectores requeridos para transmitir corte en el extremo.

Las uniones de los extremos de las vigas longitudinales, vigas de tablero y vigas compuestas se deberían abulonar

C6.13.1

Si en un empalme hay un cambio de sección, para estos requisitos se deberá utilizar la menor de las secciones. Estos requisitos se han mantenido tal como estaban en AASHTO (2002).

usando bulones de alta resistencia. Cuando no resulte práctico realizar uniones abulonadas estará permitido utilizar uniones soldadas. Cuando se las utilice, las uniones soldadas de los extremos se deberán diseñar para las cargas verticales y el momento flector resultantes de la restricción contra la rotación del extremo.

Si en una estructura hay vigas longitudinales de madera que se conectan a vigas de tablero de acero, se deberán proveer ángulos de asiento con rigidizadores para soportar la reacción total. El espesor de los ángulos de asiento no deberá ser menor que 11 mm.

6.13.2 Uniones abulonadas

6.13.2.1 Disposiciones generales

Las piezas de acero abulonadas pueden ser recubiertas o no recubiertas y una vez que los bulones se hayan ajustado deberán calzar firmemente entre sí. La documentación técnica deberá especificar que todas las superficies de las uniones, incluyendo las superficies adyacentes a la cabeza del bulón y la tuerca, deberán estar libres de escamas de laminación, excepto óxido de hierro bien adherido, y libres de polvo u otros materiales extraños.

Las uniones abulonadas de alta resistencia se podrán clasificar ya sea como uniones antideslizantes o bien como uniones por aplastamiento. Para las uniones antideslizantes el valor de la fricción deberá ser consistente con la condición especificada de las superficies de contacto tal como se especifica en el Artículo 6.13.2.8. Todos los elementos comprendidos dentro de la longitud de apriete del bulón deberán ser de acero.

6.13.2.1.1 Uniones antideslizantes

Las uniones sujetas a inversión de tensiones, cargas de impacto elevadas o vibraciones severas, o aquellas en ubicaciones en las cuales las tensiones y deformaciones debidas al deslizamiento de la unión podrían perjudicar la serviciabilidad de la estructura, se deberán clasificar como antideslizantes. Estas uniones incluyen:

- Uniones sujetas a cargas de fatiga;
- Uniones solicitadas a corte con bulones instalados en orificios holgados;
- Uniones solicitadas a corte instaladas en orificios ovalados cortos y largos cuando la fuerza que actúa sobre la unión tiene una dirección que no es perpendicular al eje de la ranura, excepto cuando el Ingeniero decida lo contrario y así lo indique en la documentación técnica;
- Uniones sujetas a importantes inversiones de cargas;

C6.13.2.1.1

En las uniones abulonadas antideslizantes sujetas a corte la carga se transmite entre las diferentes partes conectadas mediante fricción hasta un cierto nivel de fuerza, la cual depende de la fuerza de apriete total sobre las superficies de contacto y del coeficiente de fricción de las superficies de contacto. Los conectores no están sujetos a corte, y el material conectado no está sujeto a tensiones de aplastamiento. Cuando la carga aumenta hasta un nivel mayor que la resistencia friccional entre las superficies de contacto, se produce deslizamiento pero no una falla en el sentido de “rotura”. En consecuencia, las uniones antideslizantes son capaces de resistir cargas aún mayores mediante corte y aplastamiento contra el material conectado. La resistencia de la conexión no está relacionada con la carga de deslizamiento. Estas Especificaciones requieren que la resistencia al deslizamiento y las resistencias al corte y al aplastamiento se calculen en forma separada. Debido a que el efecto combinado de la

- Uniones en las cuales hay soldaduras y bulones que transmiten carga en forma conjunta en una superficie de contacto común;
- Uniones que solicitadas a tracción axial o a una combinación de tracción axial y corte;
- Uniones solicitadas exclusivamente a compresión axial, con orificios normales u ovalados solamente en una de las capas de la conexión con la dirección de la carga perpendicular a la dirección de la ranura, excepto para las conexiones diseñadas de acuerdo con los requisitos especificados en el Artículo 6.13.6.1.3; y
- Uniones en las cuales, a criterio del Ingeniero, cualquier deslizamiento afectaría críticamente el comportamiento de la unión o de la estructura, las cuales deberán estar debidamente especificadas en la documentación técnica.

Las uniones antideslizantes se deberán dimensionar de manera de evitar el deslizamiento bajo la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II, tal como se especifica en la Tabla 3.4.1-1, y para proveer adecuada resistencia al aplastamiento, corte y tracción bajo las combinaciones de cargas correspondientes al estado límite de servicio aplicable. Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.13.2.2.

6.13.2.1.2 Uniones por aplastamiento

Solamente estará permitido utilizar uniones por aplastamiento para las uniones sujetas exclusivamente a compresión axial o a las uniones en elementos de arriostamiento. Estas uniones deberán satisfacer la resistencia mayorada, R_r , en el Estado Límite de Resistencia.

6.13.2.2 Resistencia mayorada

Para las uniones antideslizantes, la resistencia mayorada, R_r , de un bulón bajo la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II se deberá

resistencia friccional con el corte o el aplastamiento no ha sido estudiado de manera sistemática, se ignora cualquier resistencia potencialmente mayor atribuible a este efecto combinado.

En el caso de los orificios ovalados, “perpendicular al eje de la ranura” se define como un ángulo comprendido aproximadamente entre 80° y 100° respecto del eje de la ranura.

La intención de este requisito es controlar que debido a las cargas adicionales que podría provocar el deslizamiento en una unión no se produzcan deformaciones permanentes que pudieran afectar la serviciabilidad de la estructura. La intención es que estos requisitos se apliquen a la sobrecarga de diseño especificada en el Artículo 3.6.1.1. Si este criterio se aplica para una situación de carga que considera la carga correspondiente al vehículo de circulación restringida, se debería considerar una reducción del factor de carga para sobrecarga viva. Las uniones antideslizantes también se deben verificar para las combinaciones de cargas para estado límite de resistencia especificadas en la Tabla 3.4.1-1, suponiendo que bajo estas cargas elevadas la unión ha sufrido deslizamiento y se ha producido aplastamiento contra el material conectado.

C6.13.2.1.2

En las uniones por aplastamiento la carga es resistida por corte en el sujetador y aplastamiento sobre el material conectado, más una cantidad incierta de fricción entre las superficies de contacto. La falla final será una falla por corte de los conectores, por arrancamiento del material conectado, o por una deformación inaceptable de los orificios. La carga de falla final es independiente de la fuerza de apriete provista por los bulones (*Kulak et al. 1987*).

C6.13.2.2

La Ecuación 1 se aplica para un Estado Límite de Servicio para el cual el factor de resistencia es igual a 1.0 y, por lo tanto, no aparece en la ecuación.

tomar como:

$$R_r = R_n \quad (6.13.2.2-1)$$

donde:

R_n = resistencia nominal como se especifica en el Artículo 6.13.2.8

La resistencia mayorada, R_r o T_r , de una unión abulonada en el Estado Límite de Resistencia se deberá tomar como:

$$R_r = \phi R_n \quad (6.13.2.2-2)$$

$$T_r = \phi T_n \quad (6.13.2.2-3)$$

donde:

R_n = resistencia nominal del bulón, de la unión o del material conectado, determinada de la siguiente manera:

- Para bulones solicitados a corte, R_n se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.2.7
- Para el material conectado en las uniones por aplastamiento, R_n se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.2.9
- Para material conectado solicitado tracción o corte, R_n se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.5

T_n = resistencia nominal del bulón, determinada de la siguiente manera:

- Para bulones solicitados a tracción axial, T_n se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.2.10
- Para bulones solicitados a una combinación de tracción axial y corte, T_n se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.2.11

ϕ = factor de resistencia para bulones especificado en el Artículo 6.5.4.2, tomado como:

- ϕ_s para bulones en corte,
- ϕ_t para bulones en tracción,
- ϕ_{bb} para bulones que apoyan sobre material (aplastamiento),
- ϕ_y o ϕ_u para material conectado en tracción, según corresponda, o
- ϕ_y para material conectado en corte.

6.13.2.3 Bulones, tuercas y arandelas

6.13.2.3.1 Bulones y tuercas

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.4.3.

6.13.2.3.2 Arandelas

Las arandelas utilizadas en las uniones abulonadas deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.4.3. En las uniones abulonadas de alta resistencia se deberán utilizar arandelas endurecidas cuando:

- La cara externa de los elementos abulonados tiene una pendiente mayor que 1:20 con respecto a un plano normal al eje del bulón;
- El ajuste se realiza mediante el método de la llave calibrada, en cuyo caso se deberá usar una arandela debajo del elemento que se gira para realizar el ajuste;
- Se instalan bulones AASHTO M 253M (ASTM A 490M) en un material cuya resistencia a la fluencia mínima especificada es menor que 345 MPa, independientemente del método de ajuste utilizado;
- De acuerdo con los requisitos aquí especificados es necesario utilizar arandelas en un orificio holgado u ovalado;
- Se instalan bulones AASHTO M 253M (ASTM A 490M) de más de 24 mm de diámetro en un orificio holgado u ovalado corto en una capa exterior, en cuyo caso tanto bajo la cabeza como bajo la tuerca se deberá utilizar como mínimo un espesor de 8.0 mm. No se deberán utilizar múltiples arandelas endurecidas.

Se deberán instalar arandelas endurecidas sobre todos los orificios holgados y ovalados cortos en una capa exterior.

Se deberán utilizar arandelas de placa estructural o una barra continua con orificios normales, de no menos de 8.0 mm de espesor, para cubrir por completo los orificios ovalados largos. Sobre la superficie exterior de la arandela de placa o la barra se deberán colocar arandelas endurecidas aptas para bulones de alta resistencia.

No se deberán instalar dispositivos indicadores de la carga sobre orificios holgados u ovalados en una capa exterior, a menos que también se provea una arandela endurecida o una arandela de placa estructural.

6.13.2.4 Orificios

6.13.2.4.1 Tipo

C6.13.2.3.2

El correcto uso de las arandelas endurecidas es importante para lograr un buen comportamiento de los bulones. Los planos deberían reflejar claramente el número y la disposición de las arandelas, especialmente aquellas que se requieren para aplicaciones con orificios ovalados.

6.13.2.4.1a Disposiciones generales

A menos que se especifique lo contrario, en las uniones abulonadas de alta resistencia se deberán utilizar orificios normales.

6.13.2.4.1b Orificios holgados

Se pueden utilizar orificios holgados en cualquiera o en todas las capas de una unión antideslizante. No se deberán utilizar orificios holgados en las uniones por aplastamiento.

6.13.2.4.1c Orificios ovalados cortos

Se pueden utilizar orificios ovalados cortos en cualquiera o en todas las capas de una unión antideslizante o por aplastamiento. En las uniones antideslizantes estas ranuras se pueden utilizar independientemente de la dirección de la carga, pero en las uniones por aplastamiento su eje mayor deberá ser perpendicular a la dirección de la carga.

6.13.2.4.1d Orificios ovalados largos

Se pueden utilizar orificios ovalados largos solamente en una de las capas tanto de las uniones antideslizantes como de las uniones por aplastamiento. En las uniones antideslizantes se pueden utilizar orificios ovalados largos independientemente de la dirección de la carga, pero en las uniones por aplastamiento estos orificios deberán ser perpendiculares a la dirección de la carga.

6.13.2.4.2 Tamaño

Las dimensiones de los orificios no deberán ser mayores que los valores especificados en la Tabla 1.

Tabla 6.13.2.4.2-1 Tamaño máximo de los orificios

| Diámetro bulón | Normal | Holgado | Ovalado corto | Ovalado largo |
|----------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| d | diámetro | diámetro | ancho \times largo | ancho \times largo |
| mm | mm | mm | mm | mm |
| 16 | 18 | 20 | 18 \times 22 | 18 \times 40 |
| 20 | 22 | 24 | 22 \times 26 | 22 \times 50 |
| 22 | 24 | 28 | 24 \times 30 | 24 \times 55 |
| 24 | 26 | 30 | 26 \times 33 | 26 \times 60 |
| 27 | 30 | 35 | 30 \times 37 | 30 \times 67 |
| 30 | 33 | 38 | 33 \times 40 | 33 \times 75 |
| 36 | 39 | 44 | 39 \times 46 | 39 \times 90 |

6.13.2.5 Tamaño de los bulones

El diámetro de los bulones no deberá ser menor que 16.0 mm. No se deberán utilizar bulones de 16.0 mm de diámetro en elementos primarios, excepto en las ramas de 64.0 mm de los perfiles angulares y en las alas de las secciones cuyas dimensiones requieren sujetadores de 16.0 mm para satisfacer otros requisitos especificados en este documento. El uso de perfiles estructurales que no permiten el uso de sujetadores de 16.0 mm de diámetro se deberá limitar a las barandas.

En los perfiles L cuyo tamaño no sea determinado por una demanda calculada se podrán utilizar:

- Bulones de 16.0 mm de diámetro en ramas de 50 mm,
- Bulones de 20.0 mm de diámetro en ramas de 64 mm,
- Bulones de 24.0 mm de diámetro en ramas de 75 mm, y
- Bulones de 27.0 mm de diámetro en ramas de 90 mm.

El diámetro de los bulones utilizados en los perfiles angulares de los elementos primarios no deberá ser mayor que un cuarto del ancho de la rama en la cual se colocan.

6.13.2.6 Separación de los bulones

6.13.2.6.1 Mínima separación y distancia libre

La mínima separación entre centros de bulones en orificios normales no deberá ser menor que tres veces el diámetro del bulón. Cuando se utilicen orificios holgados u ovalados, tanto en la dirección de la fuerza como en dirección transversal a la dirección de la fuerza, la mínima distancia libre entre los bordes de orificios para bulones adyacentes no deberá ser menor que dos veces el diámetro del bulón.

6.13.2.6.2 Máxima separación de los bulones que se utilizan para sellar una junta

Cuando se utilizan bulones para evitar que penetre humedad en una junta, la separación a lo largo de una única línea adyacente a un borde libre de una placa o perfil exterior deberá satisfacer:

$$s \leq (100 + 4.0t) \leq 175 \quad (6.13.2.6.2-1)$$

Si hay una segunda línea de sujetadores uniformemente desfasados (en tresbolillo) con respecto a aquellos en la línea adyacente al borde libre, con una separación perpendicular a la dirección de la carga menor que $38 + 4.0t$, la separación desfasada, s , en dos de estas líneas,

C6.13.2.6.1

Se anticipa que en las estructuras de acero autoprotegido sin revestimiento no se producirán problemas de corrosión en las uniones en las cuales los bulones satisfacen los requisitos sobre separación máxima especificados en el Artículo 6.13.2.6.2 (Brockenbrough 1983).

considerada en forma conjunta, deberá satisfacer:

$$s \leq 100 + 4.0t - \left(\frac{3.0g}{4.0} \right) \leq 175 \quad (6.13.2.6.2-2)$$

No es necesario que la separación desfasada sea menor que un medio de la separación requerida para el caso de una única línea de sujetadores.

donde:

t = espesor de la placa o perfil exterior de menor espesor (mm)

g = distancia entre líneas de bulones (mm)

6.13.2.6.3 Máxima separación de los bulones de hilván

C6.13.2.6.3

En los elementos armados sujetos mecánicamente se deberán utilizar bulones de hilván donde haya dos o más placas o perfiles en contacto.

En los elementos comprimidos la separación de los bulones de hilván en la dirección de la carga no deberá ser mayor que $12.0t$. La separación entre líneas de bulones adyacentes, g , no deberá ser mayor que $24.0t$. La separación desfasada entre dos líneas adyacentes de orificios desfasados (en tresbolillo) deberá satisfacer:

La intención de este requisito es asegurar que todas las piezas actúen como una unidad y, en el caso de los elementos comprimidos, evitar el pandeo.

$$p \leq 15.0t - \left(\frac{3.0g}{8.0} \right) \leq 12.0t \quad (6.13.2.6.3-1)$$

Para los elementos traccionados, la separación en la dirección de la carga no deberá ser mayor que dos veces la que aquí se especifica para los elementos comprimidos. Para los elementos traccionados la separación perpendicular a la dirección de la carga no deberá ser mayor que $24.0t$. En los elementos armados sujetos mecánicamente la máxima separación de los sujetadores en la dirección de la carga no deberá ser mayor que el menor valor requerido ya sea para los bulones que se utilizan para sellar una junta o para los bulones de hilván.

6.13.2.6.4 Máxima separación de los bulones de hilván en el extremo de los elementos comprimidos

La separación de los bulones utilizados para conectar las partes que componen un elemento comprimido no deberá ser mayor que cuatro veces el diámetro del sujetador en una longitud igual a 1.5 veces el máximo ancho del elemento. Más allá de esta longitud, la separación se puede aumentar gradualmente en una longitud igual a 1.5 veces el máximo ancho del elemento hasta llegar a la máxima separación

especificada en el Artículo 6.13.2.6.3.

6.13.2.6.5 Distancia a los extremos

Para todos los tipos de orificios, la distancia a los extremos medida a partir del centro del bulón no deberá ser menor que las distancias a los bordes especificadas en la Tabla 6.13.2.6.6-1. Cuando se utilicen orificios holgados u ovalados, la mínima distancia libre al extremo no deberá ser menor que el diámetro del bulón.

La máxima distancia al extremo deberá ser igual a la máxima distancia al borde especificada en el Artículo 6.13.2.6.6.

6.13.2.6.6 Distancias a los bordes

La mínima distancia a un borde deberá ser como se especifica en la Tabla 1.

La máxima distancia a un borde no deberá ser mayor que ocho veces el espesor de la placa exterior de menor espesor ni mayor que 125 mm.

6.13.2.6.6

Las distancias a los bordes indicadas son consistentes con los valores especificados por AISC. Estas distancias se basan en lo siguiente:

- Bordes cizallados – $1.75 \times$ diámetro, redondeado a un número par de mm
- Bordes laminados de placas o perfiles, o bordes cortados a gas – $1.25 \times$ diámetro, redondeado a un número par de mm

Tabla 6.13.2.6.6-1 Mínimas distancias a los bordes

| Diámetro del bulón | Bordes cizallados | Bordes laminados de placas o perfiles, o bordes cortados a gas |
|--------------------|-------------------|--|
| mm | mm | mm |
| 16 | 28 | 22 |
| 20 | 34 | 26 |
| 22 | 38 | 28 |
| 24 | 42 | 30 |
| 27 | 48 | 34 |
| 30 | 52 | 38 |
| 36 | 64 | 46 |

6.13.2.7 Resistencia al corte

La resistencia nominal al corte de un bulón de alta resistencia o un bulón ASTM A 307 en el Estado Límite de Resistencia en uniones en las cuales la longitud entre sujetadores extremos medida en forma paralela a la línea de acción de la fuerza es menor que 1270 mm se deberá tomar como:

- Cuando no hay filetes de rosca en el plano de corte:

C6.13.2.7

La resistencia nominal al corte se basa en la observación de que la resistencia al corte de un único bulón de alta resistencia es aproximadamente igual a 0.60 veces la resistencia a la tracción de dicho bulón (*Kulak et al. 1987*). Sin embargo, en las conexiones de corte en las cuales hay más de dos bulones en la línea de fuerza, la deformación del material conectado provoca una distribución no uniforme de la fuerza de corte en los bulones, de modo que

$$R_n = 0.48A_b F_{ub} N_s \quad (6.13.2.7-1)$$

- Cuando hay filetes de rosca en el plano de corte:

$$R_n = 0.38A_b F_{ub} N_s \quad (6.13.2.7-2)$$

donde:

A_b = área del bulón correspondiente al diámetro nominal (mm^2)

F_{ub} = mínima resistencia a la tracción especificada del bulón especificada en el Artículo 6.4.3 (MPa)

N_s = número de planos de corte por bulón

La resistencia nominal al corte de un bulón en conexiones de más de 1270 mm de longitud se deberá tomar como 0.80 veces el valor dado por las Ecuaciones 1 o 2.

Para determinar si los filetes de rosca están excluidos de los planos de corte de las superficies de contacto, la longitud de rosca del bulón se deberá determinar como la longitud de rosca especificada más dos veces la separación entre filetes de rosca.

Si en el plano de corte de la unión hay filetes de rosca de un bulón, la resistencia al corte del bulón en todos los planos de corte de la unión deberá ser el valor calculado considerando los filetes de rosca incluidos en el plano de corte.

Para los bulones ASTM A 307 el diseño al corte se deberá basar en la Ecuación 2. Si la longitud de apriete de un bulón A 307 es mayor que 5.0 veces su diámetro, la resistencia nominal se deberá reducir 1.0 por ciento por cada 1.5 mm de longitud de apriete por encima de 5.0 diámetros.

la resistencia de la conexión en términos de la resistencia media de los bulones disminuye a medida que aumenta la longitud de la unión. Antes que proveer una función que refleje esta disminución de la resistencia media de los sujetadores a medida que aumenta la longitud de la unión, simplemente se aplicó un factor de reducción único igual a 0.80 al multiplicador 0.60. Esto se puede aplicar a uniones de hasta 1270 mm de longitud sin afectar seriamente la economía de las uniones muy cortas. La resistencia nominal al corte de los bulones en uniones de más de 1270 mm de longitud se debe reducir un 20 por ciento adicional. Estudios realizados demuestran que el factor de seguridad para tensión admisible contra la falla por corte varía entre 3.3 para el caso de las uniones compactas (es decir, cortas) hasta aproximadamente 2.0 para el caso de uniones con una longitud total superior a 1270 mm. Es interesante observar que las uniones más largas y muchas veces también las más importantes son las que tenían el menor factor de seguridad, lo que indica que un factor de seguridad de 2.0 ha resultado satisfactorio para las estructuras en servicio (*Kulak et al. 1987*). Para los empalmes de ala, la longitud de 1270 mm se debe medir entre los bulones extremos a un solo lado de la conexión.

Mediante una serie de ensayos se determinó que el valor promedio de la resistencia nominal para bulones con filetes de rosca en el plano de corte es $0.833F_{ub}$, con una desviación estándar de 0.03 (*Yura et al. 1987*). Para la fórmula de la especificación se eligió un valor de alrededor de 0.80 en base al área correspondiente al área nominal del cuerpo del bulón.

La resistencia al corte de los bulones no es afectada por la tensión de pretesado de los sujetadores, siempre que las superficies de contacto del material conectado estén efectivamente en contacto.

La resistencia mayorada es igual a la resistencia nominal al corte multiplicada por un factor de resistencia menor que el que se utiliza para determinar la resistencia mayorada de un componente. Esto asegura que la máxima resistencia del puente sea limitada por la resistencia de los elementos principales y no por las conexiones.

La ausencia de requisitos sobre resistencia de diseño específicos para el caso en el cual un bulón solicitado a doble corte tiene un vástago no roscado en un plano de corte y una sección roscada en el otro plano de corte se debe a la incertidumbre en cuanto a cómo se reparte la carga de corte entre ambas superficies de corte. También reconoce que normalmente el Ingeniero no tiene acceso a información sobre la colocación de los bulones, y que por lo tanto es posible que ambos planos de corte estén en la sección roscada.

La longitud roscada de un bulón A 307 no es tan predecible como la de un bulón de alta resistencia. El requisito que exige utilizar la Ecuación 2 refleja esta

6.13.2.8 Resistencia al deslizamiento

La resistencia nominal al deslizamiento de un bulón en una unión antideslizante se deberá tomar como:

$$R_n = K_h K_s N_s P_t \quad (6.13.2.8-1)$$

donde:

N_s = número de planos de deslizamiento por bulón

P_t = mínima tensión requerida en el bulón especificada en la Tabla 1 (N)

K_h = factor que considera el tamaño del orificio, especificado en la Tabla 2

K_s = factor que considera la condición de las superficies, especificado en la Tabla 3

Tabla 6.13.2.8-1 Mínima tensión requerida en el bulón

| Diámetro del bulón, mm | Tensión requerida, P_t ($\times 10^3$ N) | |
|------------------------|---|----------------|
| | M 164 (A 325M) | M 253 (A 490M) |
| 16 | 91 | 114 |
| 20 | 142 | 179 |
| 22 | 176 | 221 |
| 24 | 205 | 257 |
| 27 | 267 | 334 |
| 30 | 326 | 408 |
| 36 | 475 | 595 |

Tabla 6.13.2.8-2 Valores de K_h

| | |
|--|------|
| para orificios normales | 1.00 |
| para orificios holgados y ovalados cortos | 0.85 |
| para orificios ovalados largos con la ranura perpendicular a la dirección de la fuerza | 0.70 |
| para orificios ovalados largos con la ranura paralela a la dirección de la fuerza | 0.60 |

incertidumbre.

Los bulones A 307 que tienen una longitud de apriete importante tienden a flexionarse, lo cual reduce su resistencia.

6.13.2.8

Para obtener mejor información sobre la probabilidad de deslizamiento de las uniones en las cuales los bulones se han pretesado según los requisitos de la Tabla 1 se han analizado estadísticamente una gran cantidad de datos desarrollados a través de numerosos ensayos. Se halló que son dos las variables que más afectan la resistencia al deslizamiento de las uniones: la tensión de pretesado del bulón y el coeficiente de fricción de las superficies de contacto, es decir el factor que considera la condición de dichas superficies.

Para los bulones en orificios holgados y ovalados se indican factores K_h menores que 1.0 debido a sus efectos sobre la tensión que se induce en los bulones al emplear cualquiera de los métodos de instalación especificados. En el caso de los bulones en orificios ovalados largos, a pesar de que la carga de deslizamiento es igual independientemente de que los bulones estén cargados en forma transversal o paralela al eje de la ranura, los valores para bulones cargados en forma paralela al eje se han reducido aún más debido a la mayor gravedad de las consecuencias de un deslizamiento.

Los criterios para resistencia al deslizamiento son para el caso de las conexiones sujetas a una carga coaxial. Para aquellos casos en los cuales la carga tiende a rotar la conexión en el plano de la superficie de contacto se debería utilizar una fórmula modificada que considere la colocación de los bulones con respecto al centro de rotación (*Kulak et al. 1987*).

La tensión requerida especificada para los bulones M164M (ASTM A 325M) mayores que M24 refleja una actualización con respecto a la Especificación ISO que lista propiedades materiales idénticas para el rango de tamaños comprendido entre M16 y M36. Esta actualización aún no se ha aplicado a las Especificaciones en unidades estadounidenses.

Los valores de tensión mínima indicados en la Tabla 1 son iguales al 70 por ciento de la mínima resistencia a la tracción de los bulones. Tradicionalmente, para la tensión requerida de los bulones se ha utilizado el mismo porcentaje de la resistencia a la tracción.

Tabla 6.13.2.8-3 Valores de K_s

| | |
|--------------------------|------|
| para Superficies Clase A | 0.33 |
| para Superficies Clase B | 0.50 |
| para Superficies Clase C | 0.33 |

Las superficies especificadas en la Tabla 3 se definen de la siguiente manera:

- Superficies Clase A: superficies libres de óxido de hierro sin pintar, y superficies limpiadas con chorro abrasivo y con recubrimientos Clase A,
- Superficies Clase B: superficies limpiadas con chorro abrasivo sin pintar y superficies limpiadas con chorro abrasivo con recubrimientos Clase B, y
- Superficies Clase C: superficies galvanizadas por inmersión en caliente a las cuales luego del galvanizado se las texturiza con cepillo de alambre.

La documentación técnica deberá especificar que en las uniones sin recubrimiento no deberá haber pintura, ni siquiera excedentes accidentales, en las áreas que se encuentren a una distancia menor que un diámetro de bulón pero no menor que 25 mm del borde de cualquier orificio y en todas las áreas dentro del patrón que forman los bulones.

El efecto de la aplicación de pintura común en ciertas partes limitadas del área de contacto y el efecto de la presencia de excedentes de pintura en toda el área de contacto han sido investigados experimentalmente (*Polyzois y Frank 1986*). Los ensayos mostraron que el área efectiva para transferencia de corte por fricción entre las superficies de contacto está concentrada en una zona anular alrededor de los bulones y próxima a los mismos. La presencia de pintura sobre las superficies de contacto a una distancia de aproximadamente 25 mm pero no menor que el diámetro de bulón medida a partir del borde del orificio no redujo la resistencia al deslizamiento. Por otra parte, la tensión de pretesado de los bulones podría no ser adecuada para aplanar completamente los materiales y hacer que estén en contacto firme alrededor de todos los bulones. Por lo tanto, estas Especificaciones requieren que todas las áreas entre bulones también estén libres de pintura.

En cuanto a las superficies libres de óxido de hierro, esta investigación determinó que aún una cantidad mínima de pintura común (es decir, un recubrimiento no calificado como Clase A) dentro del área libre de pintura especificada reducía significativamente la resistencia al deslizamiento. En las superficies limpiadas con chorro la presencia de una cantidad mínima de pintura no era tan perjudicial. Por motivos de simplicidad, estas Especificaciones prohíben la presencia de rociaduras en todas las áreas que deben estar libres de pintura en las uniones antideslizantes, independientemente del hecho que la superficie esté libre de óxido de hierro o sea limpiada con chorro abrasivo.

La documentación técnica deberá especificar que las uniones que tienen superficies de contacto pintadas deben ser limpiadas con chorro abrasivo y recubiertas con una pintura que mediante ensayos haya sido clasificada como

Como base para las tres clases de superficie se tomó el valor medio del coeficiente de deslizamiento calculado en base a numerosos ensayos realizados sobre superficies libres de óxido de hierro, superficies de acero limpiadas con

recubrimiento Clase A o Clase B.

Con sujeción a la aprobación del Ingeniero, se podrán utilizar recubrimientos que provean un factor K_s menor que 0.33, siempre que el factor K_s promedio sea establecido mediante ensayos. La resistencia nominal al deslizamiento se deberá determinar como la resistencia nominal al deslizamiento para las condiciones correspondientes a superficies Clase A, según corresponda para el tipo de orificio y bulón, multiplicada por el factor K_s determinado mediante ensayos dividido por 0.33.

La documentación técnica deberá especificar que:

- Las uniones recubiertas no se deberán armar antes que los recubrimientos se hayan curado como mínimo el tiempo usado en el ensayo de calificación, y
- Las superficies de contacto a galvanizar se deberán galvanizar por inmersión en caliente de acuerdo con la Especificación AASHTO M 111 (ASTM A 123) para Recubrimientos de Zinc (Galvanizado por Inmersión en Caliente) sobre Productos de Hierro y Acero. Las superficies luego se deberán texturar manualmente usando un cepillo de alambre. No estará permitido utilizar cepillos de alambre eléctricos.

Si una unión antideslizante está sujeta a una fuerza de tracción aplicada que reduce la fuerza neta de apriete, la resistencia nominal al deslizamiento se deberá multiplicar por el factor especificado por la Ecuación 6.13.2.11-3.

chorro abrasivo y superficies galvanizadas y texturadas. Como resultado de una investigación realizada por Frank y Yura (1981) se desarrolló un método de ensayo para determinar el coeficiente de deslizamiento para los revestimientos usados en las uniones abulonadas (AISC 1988). El método incluye requisitos sobre la realización de ensayos de fluencia lenta a largo plazo para asegurar que las pinturas clasificadas como recubrimientos Clase A, B o C se comporten de manera confiable. El método, que exige realizar una reclasificación si se modifica alguna de las variables esenciales, es la única base admitida para clasificar cualquier recubrimiento a utilizar bajo estas Especificaciones. Además, normalmente se reconocen solamente dos categorías de superficies para las pinturas a utilizar en las uniones antideslizantes: Clase A para recubrimientos que no reducen el coeficiente de deslizamiento por debajo del correspondiente a una superficie libre de óxido de hierro, y Clase B para pinturas que no reducen el coeficiente de deslizamiento por debajo del correspondiente a las superficies de acero limpiadas con chorro abrasivo.

Para abarcar aquellos casos en los cuales podría resultar adecuado utilizar un coeficiente de fricción menor que 0.33, la Especificación indica que, sujeto a la aprobación del Ingeniero y siempre que el coeficiente K_s promedio sea establecido mediante ensayos, sobre las superficies de contacto se pueden emplear recubrimientos que provean una resistencia al deslizamiento menor que la correspondiente a un recubrimiento Clase A. Se debería observar que se requiere aplicar tanto recubrimientos Clase A como recubrimientos Clase B al acero limpiado con chorro abrasivo.

La investigación citada en el párrafo precedente también estudió el efecto de la variación del tiempo transcurrido entre la aplicación del recubrimiento sobre las superficies de contacto y el armado de la unión para determinar si la pintura parcialmente curada continuaba con su proceso de curado. Se halló que en el momento de armar y apretar la unión el curado se detenía completamente y que las pinturas que no se habían terminado de curar actuaban como si fueran un lubricante, reduciendo notablemente la resistencia al deslizamiento de la junta.

En cuanto a las superficies de contacto galvanizadas, las investigaciones realizadas demuestran que el factor de deslizamiento de las superficies galvanizadas mejora significativamente al aplicarles tratamientos tales como cepillado a mano o una limpieza suave con chorro de arenilla (Birkmore y Herrschaft 1970). En cualquier caso el tratamiento debe ser controlado a fin de lograr la textura necesaria. Los cepillos de alambre eléctricos no son satisfactorios ya que tienden a pulir y no a texturar la superficie.

Ensayos realizados sobre superficies tratadas con cepillo

de alambre luego del galvanizado indican un valor promedio de 0.35 para el coeficiente de deslizamiento (*Kulak et al. 1987*). Las superficies no galvanizadas tienen coeficientes de deslizamiento mucho menores. A pesar de que el coeficiente de deslizamiento para superficies Clase C es igual que para las superficies Clase A, se ha retenido una clase separada para evitar potenciales confusiones. El valor más elevado del coeficiente de deslizamiento (0.40) dado en las especificaciones anteriores supone que luego del galvanizado la superficie es limpiada con chorro abrasivo, lo cual no constituye una práctica habitual. Tanto la experiencia en obra como los ensayos realizados indican que los elementos galvanizados pueden tener una tendencia a continuar deslizando bajo carga sostenida (*Kulak et al. 1987*). Ensayos realizados sobre uniones galvanizadas por inmersión en caliente sujetas a cargas sostenidas indican un comportamiento similar al de la fluencia lenta (creep). Los tratamientos aplicados a las superficies de contacto galvanizadas antes de armar la junta que aumentaron la resistencia al deslizamiento bajo cargas de baja duración no mejoraron significativamente el deslizamiento bajo carga sostenida.

Si se utiliza galvanizado por inmersión en caliente, y particularmente si la unión consiste en múltiples capas de material con recubrimientos de gran espesor, la relajación de la tensión de los bulones puede ser significativa y puede ser necesario tesar nuevamente los bulones luego de su ajuste inicial. Esta pérdida puede ser considerada en el diseño o bien los bulones se pueden ajustar nuevamente para llevarlos al nivel de tensión inicial indicada luego de un período de “relajación” inicial.

Incluso cuando están sujetas a las cargas anticipadas las uniones antideslizantes en las cuales los bulones se ajustan hasta lograr los niveles de pretesado especificados en la Tabla 1 generalmente no pasan a trabajar por aplastamiento, aún así se requiere que satisfagan los requisitos de los Artículos 6.13.2.7 y 6.13.2.9 para poder mantener un factor de seguridad igual a 2.0 en caso que los bulones comiencen a trabajar por aplastamiento como consecuencia de una carga importante que no haya sido anticipada.

6.13.2.9 Resistencia al aplastamiento en los orificios para bulones

El área efectiva de aplastamiento de un bulón se deberá tomar como su diámetro multiplicado por el espesor del material conectado sobre el cual apoya. El espesor efectivo de un material conectado con orificios avellanados se deberá tomar como el espesor del material conectado menos la mitad de la profundidad de la avellanadura.

Para los orificios normales, orificios holgados, orificios ovalados cortos cargados en cualquier dirección, y orificios ovalados largos paralelos a la fuerza de aplastamiento

C6.13.2.9

La tensión de aplastamiento producida por un bulón de alta resistencia que presiona contra la pared de un orificio en una pieza conectada solamente es importante como un índice del comportamiento de la pieza conectada. Por lo tanto, siempre se aplica la misma resistencia al aplastamiento, independientemente de la resistencia al corte del bulón o la presencia o ausencia de filetes de rosca en el área de aplastamiento. El valor crítico se puede derivar a partir del caso de un único bulón en el extremo de un

aplicada, la resistencia nominal de los orificios para bulones interiores y extremos en el Estado Límite de Resistencia, R_n , se deberá tomar como:

- Si los bulones están separados de manera tal que la distancia libre entre orificios es mayor o igual que $2.0d$ y la distancia libre al extremo es mayor o igual que $2.0d$:

$$R_n = 2.4dtF_u \quad (6.13.2.9-1)$$

- Si la distancia libre entre orificios es menor que $2.0d$ o si la distancia libre al extremo es menor que $2.0d$:

$$R_n = 1.2L_c t F_u \quad (6.13.2.9-2)$$

Para los orificios ovalados largos perpendiculares a la fuerza de aplastamiento aplicada:

- Si los bulones están separados de manera tal que la distancia libre entre orificios es mayor o igual que $2.0d$ y la distancia libre al extremo es mayor o igual que $2.0d$:

$$R_n = 2.0dtF_u \quad (6.13.2.9-3)$$

- Si la distancia libre entre orificios es menor que $2.0d$ o si la distancia libre al extremo es menor que $2.0d$:

$$R_n = L_c t F_u \quad (6.13.2.9-4)$$

donde:

d = diámetro nominal del bulón (mm)

t = espesor del material conectado (mm)

F_u = resistencia a la tracción del material conectado especificada en la Tabla 6.4.1-1 (MPa)

L_c = distancia libre entre orificios o entre el orificio y el extremo del elemento en la dirección de la fuerza de aplastamiento aplicada (mm)

6.13.2.10 Resistencia a la tracción

6.13.2.10.1 Disposiciones generales

Los bulones de alta resistencia sujetos a tracción axial se deberán tesar con la fuerza especificada en la Tabla 6.13.2.8-1. La fuerza de tracción aplicada se deberá tomar

elemento traccionado.

Usando bulones ajustados a mano, se ha demostrado que una placa conectada no fallará por desgarramiento en el borde libre del material si la distancia L , medida en forma paralela a la línea de la fuerza aplicada desde un único bulón hasta el borde libre del elemento hacia el cual se dirige la fuerza, no es menor que el diámetro del bulón multiplicado por la relación entre la tensión de aplastamiento y la resistencia a la tracción de la pieza conectada (*Kulak et al. 1987*).

El criterio para la resistencia nominal al aplastamiento es el siguiente:

$$\frac{L}{d} \geq \frac{r_n}{F_u} \quad (C6.13.2.9-1)$$

donde:

r_n = presión de aplastamiento nominal (MPa)

F_u = mínima resistencia a la tracción especificada de la parte conectada (MPa)

En estas Especificaciones la resistencia nominal al aplastamiento de un orificio interior se basa en la distancia libre entre dicho orificio y el orificio adyacente en la dirección de la fuerza de aplastamiento. La resistencia nominal al aplastamiento de un orificio extremo se basa en la distancia libre entre dicho orificio y el extremo del elemento. La resistencia nominal al aplastamiento del elemento conectado se puede tomar como la sumatoria de las resistencias de los orificios individuales. La distancia libre se utiliza para simplificar los cálculos para orificios holgados y ovalados.

La separación entre orificios puede ser tal que las distancias libres sean menores que los valores especificados, siempre y cuando para la resistencia nominal al aplastamiento se utilice el menor valor especificado por la Ecuación 2 o la Ecuación 4, según corresponda.

como la fuerza debida a las cargas externas mayoradas, más cualquier tracción resultante de la acción de palanca producida por la deformación de las partes conectadas, tal como se especifica en el Artículo 6.13.2.10.4.

6.13.2.10.2 Resistencia nominal a la tracción

La resistencia nominal a la tracción de un bulón, T_n , independientemente de cualquier fuerza de apriete inicial, se deberá tomar como:

$$T_n = 0.76 A_b F_{ub} \quad (6.13.2.10.2-1)$$

donde:

A_b = área del bulón correspondiente al diámetro nominal (mm^2)

F_{ub} = mínima resistencia a la tracción especificada del bulón especificada en el Artículo 6.4.3 (MPa)

6.13.2.10.3 Resistencia a la fatiga

Para el caso de bulones de alta resistencia traccionados axialmente que están sujetos a fatiga, el rango de tensiones, Δ_f , en el bulón debido a la sobrecarga de fatiga de diseño, más el incremento por carga dinámica para carga de fatiga especificado en el Artículo 3.6.1.4, más la fuerza de palanca resultante de la aplicación cíclica de la carga de fatiga, deberá satisfacer la Ecuación 6.6.1.2.2-1.

Para calcular el rango de tensiones del bulón se deberá usar el diámetro nominal del bulón. En ningún caso la fuerza de palanca calculada podrá ser mayor que 60 por ciento de la carga aplicada externamente.

En las uniones sujetas a fatiga no se deberán utilizar bulones ASTM A 307 de acero de bajo contenido de carbono.

6.13.2.10.4 Acción de palanca

La fuerza de tracción debida a la acción de palanca se deberá tomar como:

$$Q_u = \left[\frac{3b}{8a} - \frac{t^3}{328\,000} \right] P_u \quad (6.13.2.10.4-1)$$

donde:

Q_u = tracción debida a la acción de palanca en cada bulón debida a las cargas mayoradas, considerada igual a cero si es negativa (N)

6.13.2.10.2

La resistencia de diseño recomendada es aproximadamente igual a la fuerza de apriete inicial; por lo tanto, bajo las cargas de servicio, en los bulones de alta resistencia la tensión variará poco o nada. Por este motivo se exige que en las uniones en las cuales las cargas aplicadas someten a los bulones a tracción axial dichos bulones estén totalmente tesados.

6.13.2.10.3

Los bulones A 325M y A 490M correctamente ajustados no son afectados negativamente por la aplicación reiterada de la tensión de tracción por carga de servicio recomendada, siempre que el material de los accesorios sea lo suficientemente rígido como para que la fuerza de palanca sea una fracción relativamente pequeña de la tracción aplicada. Los requisitos referentes a la fatiga por tracción de los bulones se basan en el estudio de informes de ensayos que se realizaron sometiendo bulones a cargas de tracción repetitivas hasta su fatiga (*Kulak et al. 1987*).

C6.13.2.10.4

La Ecuación 1 usada para estimar la magnitud de la fuerza debida a la acción de palanca es una simplificación que da ASCE (1971) de una expresión semiempírica (*Douty y McGuire 1965*). Esta fórmula simplificada tiende a sobrestimar la fuerza de palanca y da por resultado diseños conservadores (*Nair et al. 1974*).

P_u = tracción directa en un bulón debida a las cargas mayoradas (N)

a = distancia desde el centro del bulón hasta el borde de la placa (mm)

b = distancia entre el centro del bulón y el talón del chaflán de una parte conectada (mm)

t = espesor de la parte conectada de menor espesor (mm)

6.13.2.11 Combinación de tracción y corte

La resistencia nominal a la tracción de un bulón sujeto a una combinación de corte y tracción axial, T_n , se deberá tomar como:

- Si $\frac{P_u}{R_n} \leq 0.33$, entonces:

$$T_n = 0.76A_b F_{ub} \quad (6.13.2.11-1)$$

- Caso contrario:

$$T_n = 0.76A_b F_{ub} \sqrt{1 - \left(\frac{P_u}{\phi_s R_n} \right)^2} \quad (6.13.2.11-2)$$

donde:

A_b = área del bulón correspondiente al diámetro nominal (mm²)

F_{ub} = mínima resistencia a la tracción especificada del bulón especificada en el Artículo 6.4.3 (MPa)

P_u = esfuerzo de corte que actúa sobre el bulón debido a las cargas mayoradas (N)

R_n = resistencia nominal al corte de un bulón especificada en el Artículo 6.13.2.7 (N)

La resistencia nominal de un bulón en una unión antideslizante bajo la Combinación de Cargas correspondiente al Estado Límite de Servicio II, especificada en la Tabla 3.4.1-1, y sujeto a una combinación de corte y tracción axial no deberá ser mayor que la resistencia nominal al deslizamiento especificada en el Artículo 6.13.2.8 multiplicada por:

$$1 - \frac{T_u}{P_t} \quad (6.13.2.11-3)$$

C6.13.2.11

La resistencia nominal a la tracción de los bulones sujetos a una combinación de tracción axial y corte se describe en base a curvas de interacción elípticas, las cuales toman en cuenta el efecto de la longitud de la conexión sobre los bulones cargados en corte, la relación entre la resistencia al corte y la resistencia a la tracción de los bulones roscados, y las relaciones entre el área de la raíz y el área nominal del cuerpo y entre el área solicitada a tracción y el área nominal del cuerpo (*Chesson et al. 1965*). Las Ecuaciones 1 y 2 son simplificaciones conservadoras del conjunto de curvas elípticas, y representan el caso para bulones A 325M donde los filetes de rosca no se excluyen del plano de corte. AISC (1988) contiene curvas para otros casos. No es necesario reducir la resistencia nominal a la tracción si la fuerza de corte aplicada al bulón debido a las cargas mayoradas es menor o igual que 33 por ciento de la resistencia nominal del bulón.

donde:

T_u = fuerza de tracción debida a las cargas mayoradas bajo la Combinación de Cargas correspondiente al Estado Límite de Servicio II (N)

P_t = mínima tensión requerida en el bulón especificada en la Tabla 6.13.2.8-1 (N)

6.13.3 Uniones soldadas

6.13.3.1 Disposiciones generales

El metal base, el metal de soldadura y los detalles de diseño de las soldaduras deberán satisfacer los requisitos del Código para Soldadura de Puentes *AASHTO/AWS D1.5M/D1.5*. Los símbolos referentes a las soldaduras deberán ser los especificados en la Publicación A2.4 de la AWS.

En las soldaduras de ranura y filete se deberá utilizar metal de soldadura de resistencia equivalente a la del metal base, a menos que al detallar las soldaduras de filete el Ingeniero opte por especificar clasificaciones de electrodos con resistencias menores que el metal base, en cuyo caso el procedimiento de soldadura y el metal de soldadura se deberán seleccionar de manera de garantizar que las soldaduras estén libres de defectos.

6.13.3.2 Resistencia mayorada

6.13.3.2.1 Disposiciones generales

La resistencia mayorada de las uniones soldadas, R_r , en el Estado Límite de Resistencia se deberá tomar como se especifica en los Artículos 6.13.3.2.2 a 6.13.3.2.4.

El área efectiva de la soldadura se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.3.3. La resistencia mayorada de los elementos de conexión se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.13.5.

6.13.3.2.2 Uniones mediante soldaduras de ranura de penetración total

6.13.3.2.2a Tracción y compresión

La resistencia mayorada de las uniones mediante soldaduras de ranura de penetración total sujetas a tracción o compresión normal al área efectiva o paralela al eje de la

C6.13.3.1

Para las soldaduras de filete que conectan aceros con resistencias a la fluencia mínimas especificadas mayores que 345 MPa se recomienda fuertemente utilizar un metal de soldadura de menor resistencia que el metal base. Investigaciones realizadas han demostrado que las soldaduras en las cuales el metal de soldadura tiene menor resistencia que el metal base son mucho menos sensibles a la fisuración retrasada inducida por hidrógeno y por lo tanto es más probable que con ellas se logren soldaduras libres de defectos de manera más consistente.

C6.13.3.2.1

La resistencia mayorada de una unión soldada es determinada por la resistencia del metal base o del material de soldadura depositado. La resistencia nominal de las soldaduras de filete es determinada por el área de la garganta efectiva, mientras que la resistencia nominal de las partes conectadas es determinada por sus respectivos espesores.

Conservadoramente, la resistencia correspondiente a la clasificación del metal de soldadura se puede tomar igual al número de clasificación, EXX. Las letras XX representan los mínimos niveles de resistencia de los electrodos en ksi (para convertir a MPa multiplicar por 6.895).

C6.13.3.2.2a

En las soldaduras de ranura las fuerzas máximas generalmente son de tracción o compresión. Ensayos realizados han demostrado que las soldaduras de ranura del

soldadura se deberá tomar igual a la resistencia mayorada del metal base.

mismo espesor que las partes conectadas son adecuadas para desarrollar la resistencia mayorada de las partes conectadas.

6.13.3.2.2b Corte

La resistencia mayorada de las uniones mediante soldaduras de ranura de penetración total sujetas a corte en el área efectiva se deberá tomar como el menor valor entre el valor obtenido mediante la Ecuación 1 y 60 por ciento de la resistencia mayorada del metal base en tracción:

$$R_r = 0.6\phi_{el}F_{exx} \quad (6.13.3.2.2b-1)$$

donde:

F_{exx} = resistencia del metal de soldadura (MPa)

ϕ_{el} = factor de resistencia para el metal de soldadura especificado en el Artículo 6.5.4.2

6.13.3.2.3 Uniones mediante soldaduras de ranura de penetración parcial

6.13.3.2.3a Tracción o compresión

C6.13.3.2.3a

La resistencia mayorada de las uniones mediante soldaduras de ranura de penetración parcial sujetas a tracción o compresión paralela al eje de la soldadura o compresión normal al área efectiva se deberá tomar como la resistencia mayorada del metal base.

La resistencia mayorada de las uniones mediante soldaduras de ranura de penetración parcial sujetas a tracción normal al área efectiva se deberá tomar como el menor valor entre el valor obtenido mediante la Ecuación 1 y la resistencia mayorada del metal base:

Ver las restricciones que se aplican respecto del uso de soldaduras de ranura de penetración parcial en el Artículo 6.6.1.2.4.

$$R_r = 0.6\phi_{el}F_{exx} \quad (6.13.3.2.3a-1)$$

donde:

ϕ_{el} = factor de resistencia para el metal de soldadura especificado en el Artículo 6.5.4.2

6.13.3.2.3b Corte

La resistencia mayorada de las uniones mediante soldaduras de ranura de penetración parcial sujetas a corte paralelo al eje de la soldadura se deberá tomar como el menor valor entre la resistencia nominal mayorada del material conectado especificada en el Artículo 6.13.5 y la resistencia mayorada del metal de soldadura tomada como:

$$R_r = 0.6\phi_{e2}F_{exx} \quad (6.13.3.2.3b-1)$$

donde:

ϕ_{e2} = factor de resistencia para el metal de soldadura especificado en el Artículo 6.5.4.2

6.13.3.2.4 Uniones mediante soldaduras de filete

6.13.3.2.4a Tracción y compresión

La resistencia mayorada de las uniones mediante soldaduras de filete sujetas a tracción o compresión paralela al eje de la soldadura se deberá tomar como la resistencia mayorada del metal base.

6.13.3.2.4b Corte

La resistencia de las soldaduras de filete sujetas a corte que se hayan realizado con metal de soldadura de resistencia equivalente o menor que la del metal base y que respondan a los típicos perfiles de soldadura se deberá tomar como el producto entre el área efectiva especificada en el Artículo 6.13.3.3 y la resistencia mayorada del metal de soldadura tomada como:

$$R_r = 0.6\phi_{e2}F_{exx} \quad (6.13.3.2.4b-1)$$

6.13.3.3 Área efectiva

El área efectiva deberá ser la longitud efectiva de la soldadura multiplicada por la garganta efectiva. La garganta efectiva será la menor distancia desde la raíz de la junta hasta la cara de la soldadura.

C6.13.3.2.4a

Las uniones entre ala y alma mediante soldaduras de filete se pueden diseñar sin considerar la tensión de tracción o compresión en los elementos paralelos al eje de las soldaduras.

C6.13.3.2.4b

La resistencia mayorada de las soldaduras de filete sujetas a corte a lo largo de la longitud de la soldadura depende de la resistencia del metal de soldadura y de la dirección de la carga aplicada, que puede ser paralela o transversal a la soldadura. En ambos casos la soldadura falla por corte, pero el plano de rotura no es el mismo. La fluencia por corte no es crítica en las soldaduras, ya que el material se endurece por deformación sin que ocurran grandes deformaciones globales. Por lo tanto, la resistencia al corte mayorada se basa en la resistencia al corte del metal de soldadura multiplicado por un factor de resistencia apropiado para asegurar que la parte conectada pueda desarrollar la totalidad de su resistencia sin que la soldadura falle prematuramente.

Cuando las soldaduras de filete están sujetas a cargas excéntricas que producen una combinación de tensiones de corte y flexión, éstas se deben dimensionar en base a la sumatoria vectorial directa de las fuerzas de corte que actúan sobre la soldadura.

Es raro que una soldadura falle en el cateto de la soldadura en el metal base. El área efectiva aplicable para el metal base es el cateto de la soldadura, que es 30 por ciento mayor que la garganta de la soldadura. Si se utiliza metal de soldadura de resistencia excesiva o si la garganta de la soldadura tiene convexidad excesiva, la capacidad puede ser determinada por el cateto de la soldadura y la resistencia a la fractura por corte del metal base $0.6F_u$.

C6.13.3.3

El Artículo 2.3 del Código para Soldadura de Puentes AASHTO/AWS D1.5M/ D1.5 contiene requisitos adicionales.

6.13.3.4 Tamaño de las soldaduras de filete

C6.13.3.4

El tamaño de una soldadura de filete que se puede asumir al diseñar una conexión debe ser tal que las fuerzas debidas a las cargas mayoradas no superen la resistencia mayorada de la conexión especificada en el Artículo 6.13.3.2.

El máximo tamaño de las soldaduras de filete que se pueden usar a lo largo de los bordes de las partes conectadas se deberá tomar como:

- Para material de espesor menor que 6 mm: el espesor del material conectado, y
- Para material de espesor mayor o igual que 6 mm: 2 mm menos que el espesor del material, a menos que la documentación técnica especifique que la debe realizarse de manera de obtener el espesor de garganta total.

El mínimo tamaño de una soldadura de filete se debería tomar como se especifica en la Tabla 1. No es necesario que el tamaño de la soldadura sea mayor que el espesor de la pieza conectada de menor espesor. El Ingeniero podrá autorizar el uso de soldaduras de filete de menor tamaño en base a la tensión aplicada y al uso de un precalentamiento adecuado.

Los requisitos referentes al tamaño mínimo de las soldaduras de filete se basan en el rápido enfriamiento que producen los materiales de gran espesor en las soldaduras pequeñas, no en consideraciones de resistencia. El enfriamiento muy rápido del metal de soldadura puede provocar una pérdida de ductilidad. Además, la restricción contra la contracción del metal de soldadura que proveen los materiales de gran espesor puede provocar la fisuración de las soldaduras. Una soldadura de filete de 8 mm es la soldadura de mayor tamaño que se puede depositar en una única pasada cuando se utilizan procedimientos de soldadura manuales, pero se deberán proveer temperaturas mínimas de precalentamiento e interpaso.

Tabla 6.13.3.4-1 Tamaño mínimo de las soldaduras de filete

| Espesor del metal base de la pieza conectada de menor espesor (<i>T</i>) | Tamaño mínimo de la soldadura de filete |
|--|---|
| mm | mm |
| $T \leq 20$ | 6 |
| $20 < T$ | 8 |

6.13.3.5 Mínima longitud efectiva de las soldaduras de filete

La mínima longitud efectiva de una soldadura de filete será igual a cuatro veces su tamaño y en ningún caso será menor que 40 mm.

6.13.3.6 Retorno de los extremos de las soldaduras de filete

C6.13.3.6

Las soldaduras de filete que resisten una fuerza de tracción no paralela al eje de la soldadura o dimensionadas para soportar tensiones repetidas no deberán terminar en las esquinas de una pieza o elemento. Cuando sea posible hacer estos retornos en el mismo plano, los retornos deberán girar la esquina de forma continua, en todo su tamaño, en una

No se deben proveer retornos de los extremos alrededor de los rigidizadores transversales.

longitud igual a dos veces el tamaño de la soldadura. Los retornos de los extremos de las soldaduras deberán estar indicados en la documentación técnica.

Las soldaduras de filete depositadas en los lados opuestos de un plano de contacto común entre dos partes se deberán interrumpir en una esquina común a ambas soldaduras.

6.13.3.7 Soldaduras de sellado

Las soldaduras de sellado deberían ser soldaduras continuas que combinen las funciones de sellado y resistencia, y su sección solamente debería variar de acuerdo con los requisitos de resistencia o los requisitos sobre tamaño mínimo de las soldaduras de filete.

6.13.4 Resistencia a la rotura de bloque de corte

Las conexiones de las almas de las vigas rebajadas y todas las conexiones traccionadas, incluyendo las placas de unión, las platabandas y las placas de empalme, se deberán investigar para asegurar que se provea material de conexión adecuado para desarrollar la resistencia mayorada de la conexión.

La conexión se deberá investigar considerando todos los posibles planos de falla en el elemento y las placas de unión. Estos planos deberán incluir tanto aquellos paralelos como aquellos perpendiculares a las fuerzas aplicadas. Se deberá considerar que los planos paralelos a la fuerza aplicada solamente soportan tensiones de corte. Se deberá considerar que los planos perpendiculares a la fuerza aplicada resisten solamente tensiones de tracción.

La resistencia mayorada de la combinación de planos paralelos y perpendiculares se deberá tomar como:

- Si $A_m \geq 0.58A_{vm}$, entonces:

$$R_r = \phi_{bs} (0.58F_y A_{vg} + F_u A_m) \quad (6.13.4-1)$$

- Caso contrario:

$$R_r = \phi_{bs} (0.58F_u A_{vm} + F_y A_{tg}) \quad (6.13.4-2)$$

donde:

A_{vg} = área bruta a lo largo del plano que resiste tensión de corte (mm^2)

A_{vm} = área neta a lo largo del plano que resiste tensión de corte (mm^2)

A_{tg} = área bruta a lo largo del plano que resiste tensión de tracción (mm^2)

A_m = área neta a lo largo del plano que resiste tensión de tracción (mm^2)

C6.13.4

La rotura de bloque de corte es uno entre varios modos de falla posibles de las platabandas, placas de unión y placas de empalme. Igualmente se requiere verificar otros potenciales modos de falla y secciones críticas (por ejemplo, para el ala de una viga o una platabanda la presencia de una sección neta que se extienda a través de todo el ancho de la placa y que por lo tanto no tenga planos paralelos puede ser un requisito más severo que el modo de rotura de bloque de corte). Se deberían consultar los requisitos de los Artículos 6.13.5, 6.13.6 y 6.14.2.8.

Ensayos realizados sobre vigas rebajadas indican que se puede producir un modo de falla por arrancamiento a lo largo del perímetro de los orificios para bulones (*Birkemoe y Gilmour 1978*). Para este modo de falla de bloque de corte la resistencia se determina como la suma de la resistencia nominal al corte en uno o varios recorridos de corte y la resistencia nominal a la tracción en un segmento perpendicular. El modo de rotura de bloque de corte no se limita a los extremos rebajados de las vigas. Las conexiones traccionadas también son susceptibles a este modo de falla. Se debería verificar el modo de rotura de bloque de corte alrededor de la periferia de las uniones soldadas.

Ensayos más recientes (*Ricles y Yura 1983; Hardash y Bjorhovde 1985*) sugieren que es razonable sumar la resistencia a la fluencia en un plano con la resistencia a la fractura en el plano perpendicular. Por lo tanto, se pueden calcular dos posibles resistencias a la rotura de bloque de corte: la resistencia a la fractura F_u en la sección neta de tracción junto con la fluencia por corte, $0.58F_y$, en la sección bruta en el/los plano(s) de corte, o bien la fractura $0.58F_u$ en el/las área(s) neta(s) de corte combinada con la fluencia F_y en el área neta de tracción.

Las dos fórmulas son consistentes con la filosofía adoptada para los elementos traccionados, según la cual para la fluencia se utiliza el área bruta y para la fractura se

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del material conectado (MPa)

F_u = mínima resistencia a la tracción especificada del material conectado especificada en la Tabla 6.4.1-1 (MPa)

ϕ_{bs} = factor de resistencia para bloque de corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

utiliza el área neta. La resistencia determinante dada por las Ecuaciones 1 y 2 se selecciona en base a la relación entre A_m y A_{vn} .

El área bruta se deberá determinar como la longitud del plano multiplicada por el espesor del componente. El área neta será el área bruta menos el número de orificios total o parcialmente en el plano, multiplicada por el diámetro nominal del orificio especificado en la Tabla 6.13.2.4.2-1, más 2.0 mm, por el espesor del componente.

Al determinar la sección neta de los cortes que soportan tensiones de tracción se deberá determinar el efecto de los orificios desfasados adyacentes a los cortes de acuerdo con el Artículo 6.8.3. Para las secciones netas que soportan tensiones de corte se deberá deducir la totalidad del diámetro efectivo de los orificios cuyo centro se encuentre a dos diámetros del corte. Los orificios más alejados se podrán despreciar.

6.13.5 Elementos de conexión

6.13.5.1 Disposiciones generales

Este artículo se deberá aplicar al diseño de los elementos de conexión tales como platabandas, placas de empalme, perfiles, ménsulas y placas de unión solicitados a tracción o corte.

6.13.5.2 Tracción

La resistencia mayorada, R_t , en tracción se deberá tomar como el menor de los valores obtenidos de las Ecuaciones 6.8.2.1-1 o 6.8.2.1-2 para fluencia y fractura, respectivamente, o bien como la resistencia a la rotura de bloque de corte especificada en el Artículo 6.13.4.

Al determinar P_{nu} como se especifica en la Ecuación 6.8.2.1-2 para las placas de unión, platabandas y placas de empalme, el factor de reducción, U , especificado en el Artículo 6.8.2.2 se deberá tomar igual a 1.0 y el área neta de la placa, A_n , utilizada en la Ecuación 6.8.2.1-2 no se deberá tomar mayor que 85 por ciento del área bruta de la placa.

C6.13.5.2

Ensayos realizados demuestran que si la relación $A_n/A_g \leq 0.85$ habrá fluencia en la sección bruta antes que la sección neta alcance su capacidad de tracción (*Kulak et al. 1987*). Debido a que la longitud de la placa de unión, platabanda o placa de empalme es pequeña en comparación con la longitud del elemento, la deformación inelástica de la sección bruta es limitada. Por este motivo el área neta del elemento de conexión se limita a $0.85A_g$, para así reconocer la limitada deformación inelástica y para proveer una capacidad de reserva.

6.13.5.3 Corte

Para los elementos de conexión en corte, la resistencia mayorada, R_r , se deberá tomar como:

$$R_r = \phi_v R_n \quad (6.13.5.3-1)$$

$$R_n = 0.58 A_g F_y \quad (6.13.5.3-2)$$

donde:

R_n = resistencia nominal en corte (N)

A_g = área bruta del elemento de conexión (mm^2)

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del elemento de conexión (MPa)

ϕ_v = factor de resistencia para corte como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

6.13.6 Empalmes

6.13.6.1 Empalmes abulonados

6.13.6.1.1 Disposiciones generales

Los empalmes abulonados se deberán diseñar en el Estado Límite de Resistencia para satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.13.1. Cuando en un empalme haya un cambio de sección, para el diseño se deberá utilizar la menor de las dos secciones conectadas.

6.13.6.1.2 Elementos traccionados

Los empalmes para elementos traccionados deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.13.5.2. Los empalmes para elementos traccionados se deberán diseñar usando uniones antideslizantes como se especifica en el Artículo 6.13.2.1.1.

6.13.6.1.3 Elementos comprimidos

Los empalmes para elementos comprimidos detallados de manera que los extremos que apoyan entre sí están fresados y en contacto pleno y para los cuales la documentación técnica especifica la realización de inspecciones durante la fabricación y montaje se pueden dimensionar para no menos que 50 por ciento de la menor de las resistencias mayoradas de las secciones empalmadas.

Los empalmes en los cordones de las celosías, elementos de arcos y columnas deberían estar ubicados tan cerca de los

C6.13.6.1.3

Esto es consistente con los requisitos de las ediciones anteriores de las Especificaciones Estándares que permitían que hasta 50 por ciento de la fuerza en un elemento comprimido fuera soportada a través de un empalme por aplastamiento sobre los extremos fresados de los componentes.

puntos de panel como sea posible y en general del lado en que ocurre la menor solicitación. La disposición de las placas, perfiles u otros elementos de empalme deberá ser tal que se consideren adecuadamente todas las solicitaciones en las partes que componen los elementos empalmados.

6.13.6.1.4 Elementos solicitados a flexión

6.13.6.1.4a Disposiciones generales

En los tramos continuos los empalmes se deberían realizar en o cerca de los puntos de contraflexión bajo carga permanente. Los empalmes de alma y ala en zonas sujetas a inversión de tensiones se deberán investigar tanto para flexión positiva como para flexión negativa.

Tanto en los empalmes de alma como en los empalmes de ala no deberá haber menos de dos filas de bulones a cada lado de la unión. En los empalmes abulonados no se deberán utilizar orificios holgados ni ovalados ni en el elemento ni tampoco en las platabandas.

Los empalmes abulonados para elementos solicitados a flexión se deberán diseñar usando uniones antideslizantes tal como se especifica en el Artículo 6.13.2.1.1. Las uniones también se deberán dimensionar para evitar el deslizamiento durante el montaje de los elementos de acero y durante el hormigonado del tablero.

La resistencia a la flexión mayorada de las alas en el punto de empalme en el Estado Límite de Resistencia deberá satisfacer los requisitos aplicables del Artículo 6.10.6.2.

Las tensiones de flexión debidas a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia y para verificar el deslizamiento de las uniones abulonadas en el punto de empalme se deberán determinar usando las propiedades de la sección bruta.

Si en los empalmes de ala abulonados se utilizan perfiles angulares se deberán usar dos perfiles angulares, uno a cada lado del elemento solicitado a flexión.

C6.13.6.1.4a

Para poder determinar cuál es la condición determinante, los empalmes abulonados ubicados en regiones sujetas a inversión de tensiones próximas a puntos de contraflexión bajo carga permanente se deben verificar tanto para flexión positiva como para flexión negativa.

Para asegurar la correcta alineación y estabilidad de la viga durante la construcción, los empalmes en las almas y alas no pueden tener menos de dos filas de bulones a cada lado de la unión. Además, con el objeto de mejorar el control de la geometría durante el montaje y considerando que si se utilizan orificios holgados u ovalados en una unión de alma abulonada cargada excéntricamente se podría producir una reducción de la resistencia, no está permitido utilizar orificios holgados ni orificios ovalados ni en los elementos ni en las platabandas.

Asimismo, para un mejor control de la geometría, las uniones abulonadas tanto para empalmes en las almas como para empalmes en las alas se deben dimensionar de manera de evitar que ocurra deslizamiento bajo las solicitaciones máximas inducidas durante el montaje de los elementos de acero y el hormigonado del tablero.

Para las siguientes secciones con orificios en el ala traccionada:

- Secciones compuestas compactas en flexión positiva;
- Secciones compuestas en flexión negativa o secciones no compuestas con almas compactas o no compactas diseñadas de acuerdo con los requisitos del Apéndice A,

para las cuales se permite que la resistencia nominal a la flexión sea mayor que el momento en primera fluencia en Estado Límite de Resistencia, aún no se ha documentado exhaustivamente que en estas secciones se pueda producir la plastificación total de la sección transversal antes que se produzca la fractura de la sección neta del ala de tracción. Además, los requisitos para diseño de empalmes de este Artículo no consideran la contribución de una considerable fluencia del alma a la resistencia a la flexión de las secciones arriba listadas. Por lo tanto, en las secciones transversales que tienen orificios, la resistencia a la flexión mayorada del ala traccionada en el Estado Límite de Resistencia o para determinar la construibilidad se limita

conservadoramente un valor menor o igual que la mínima tensión de fluencia especificada del ala de tracción de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.1.8. En consecuencia, este requisito probablemente evitará que en estas secciones se ubiquen empalmes abulonados en o cerca de los puntos de máximo momento aplicado donde en Estado Límite de Resistencia se permite una fluencia significativa del alma, más allá de la fluencia localizada del alma permitida para los elementos híbridos.

En el pasado los empalmes para elementos solicitados a flexión típicamente se diseñaban tratando a las alas y al alma de la viga como componentes individuales y luego calculando un momento de diseño para el empalme a cada componente. Sin embargo, no se puede aplicar superposición de momentos en las secciones compuestas cuando éstas están sometidas a niveles de tensiones elásticas debido a que los momentos se aplican a secciones diferentes, mientras que sí es válido superponer las tensiones. Es por esta causa que se prefiere utilizar las tensiones de flexión para calcular las acciones necesarias para diseñar el empalme.

La fatiga del metal base adyacente a la unión antideslizante en las platabandas se puede verificar como se especifica en la Tabla 6.6.1.2.3-1 usando la sección bruta de las platabandas y el elemento. Sin embargo, las áreas de las platabandas de ala y de alma con frecuencia son mayores o iguales que las áreas del ala o el alma a la cual están unidas. Las alas y el alma se verifican separadamente ya sea para categorías para diseño a fatiga equivalentes o más críticas. Por lo tanto, el diseño de las platabandas generalmente no es determinado por la fatiga.

6.13.6.1.4b Empalmes en las almas

Las platabandas de las almas y sus conexiones se deberán diseñar para corte, el momento debido a la excentricidad del corte en el punto de empalme y la parte del momento flector que se supone resiste el alma en el punto de empalme. Para las secciones tipo cajón simple, y para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1 no son totalmente efectivas, el corte se deberá tomar como la sumatoria del corte flexional más el corte por torsión de Saint-Venant en aquella alma en la cual ambos cortes son aditivos. Para los cajones con almas inclinadas, los empalmes en el alma se deberán diseñar para la componente del corte vertical en el plano del alma.

Como mínimo, en el Estado Límite de Resistencia, el corte de diseño, V_{uw} , se deberá tomar de la siguiente manera:

- Si $V_u < 0.5\phi_v V_n$, entonces:

C6.13.6.1.4b

Las Ecuaciones 1 y 2 proporcionan un corte de diseño a utilizar para el diseño de platabandas para almas y sus conexiones en Estado Límite de Resistencia más consistente que las ecuaciones que incluían ediciones anteriores de las Especificaciones Estándares y la primera edición de las Especificaciones para LRFD. La Ecuación 1 limita arbitrariamente el aumento del corte en el punto de empalme a 50 por ciento del corte debido a la carga mayorada, V_u , donde V_u es menor que 50 por ciento de la resistencia al corte mayorada, $V_r = \phi_v V_n$, en el punto de empalme. El aumento del corte se limita a 50 por ciento de V_u debido a que la posibilidad de que V_u varíe respecto de su valor calculado es menor que la del momento: es poco probable que en el empalme se produzcan grandes variaciones accidentales del corte. Además, en los empalmes, el máximo corte generalmente no ocurre simultáneamente con el máximo momento. Por lo tanto, se considera razonable utilizar un menor valor del corte de diseño en las regiones donde el corte aplicado es bajo.

$$V_{uw} = 1.5V_u \quad (6.13.6.1.4b-1)$$

- Caso contrario:

$$V_{uw} = \frac{(V_u + \phi_v V_n)}{2} \quad (6.13.6.1.4b-2)$$

donde:

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

V_u = corte debido a las cargas mayoradas en el punto de empalme (N)

V_n = resistencia nominal al corte determinada como se especifica en los Artículos 6.10.9.2 y 6.10.9.3 para almas no rigidizadas y rigidizadas, respectivamente (N)

El corte de diseño en el Estado Límite de Resistencia no deberá ser mayor que el menor valor entre la resistencia al corte mayorada de las platabandas del alma especificada en el Artículo 6.13.4 y la resistencia al corte de las platabandas del alma especificada en el Artículo 6.13.5.3.

La excentricidad del corte de diseño se deberá tomar como la distancia entre el eje del empalme y el baricentro de la conexión del lado de la unión bajo consideración.

En el Estado Límite de Resistencia, la tensión flexional en las platabandas de las almas no deberá ser mayor que la resistencia mínima a la fluencia especificada de las platabandas multiplicada por el factor de resistencia, ϕ_f , especificado en el Artículo 6.5.4.2.

Las uniones abulonadas para los empalmes en las almas se deberán diseñar como uniones antideslizantes para la máxima fuerza de diseño resultante en los bulones. Como mínimo, para verificar el deslizamiento de los bulones de los empalmes en las almas, el corte de diseño se deberá tomar como el corte en el punto de empalme bajo la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II, tal como se especifica en la Tabla 3.4.1-1.

Las almas se deberán empalmar simétricamente colocando platabandas a ambos lados. En tanto sea posible, las platabandas deberán abarcar la totalidad de la profundidad entre las alas.

También es más razonable usar un menor valor del corte de diseño para las vigas laminadas, las cuales tienen valores de resistencia al corte mayorada considerablemente mayores. Para los casos en los cuales V_u es mayor que 50 por ciento de V_r , el corte de diseño se determina mediante la Ecuación 2 como el promedio entre V_u y V_r . Para verificar el deslizamiento de las uniones abulonadas, el corte de diseño se toma simplemente como el corte en el punto de empalme bajo la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II definida en la Tabla 3.4.1-1.

Los empalmes en las almas también se deben diseñar para el momento debido a la excentricidad del corte de diseño. La excentricidad se define explícitamente como la distancia desde el eje del empalme hasta el baricentro de la conexión del lado de la unión bajo consideración, no como la distancia entre los baricentros de las uniones a cada lado de la unión (*Sheikh-Ibrahim y Frank 1998*).

Para determinar qué proporción del momento total soporta el alma en el punto de empalme se han utilizado muchos enfoques diferentes, los cuales no siempre han producido resultados consistentes. Por motivos que se discutirán a continuación, se sugiere que la proporción del momento total que se supone soporta el alma se aplique en la mitad de la profundidad del alma. Como resultado, en las secciones en las cuales el eje neutro no está ubicado a la mitad de la profundidad del alma, para establecer el equilibrio es necesario aplicar una fuerza resultante horizontal en la mitad de la profundidad. Se puede asumir que esta fuerza resultante horizontal se distribuye igualmente entre todos los bulones del alma. Se sugiere utilizar las siguientes ecuaciones para determinar un momento de diseño, M_{uw} , y una fuerza resultante horizontal de diseño, H_{uw} , para aplicar en la mitad de la profundidad del alma para diseñar las platabandas de las almas y sus conexiones en el Estado Límite de Resistencia:

$$M_{uw} = \frac{t_w D^2}{12} |R_h F_{cf} - R_{cf} f_{ncf}| \quad (C6.13.6.1.4b-1)$$

$$H_{uw} = \frac{t_w D}{2} |R_h F_{cf} - R_{cf} f_{ncf}| \quad (C6.13.6.1.4b-2)$$

donde:

t_w = espesor del alma (mm)

D = profundidad del alma (mm)

R_h = factor de hibridez especificado en el Artículo 6.10.1.10.1. Para las secciones híbridas en las cuales F_{cf} no es mayor que la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma, el factor de hibridez

se deberá tomar igual a 1.0

F_{cf} = tensión de diseño para el ala determinante en el punto de empalme especificada en el Artículo 6.13.6.1.4c; positiva si es de tracción y negativa si es de compresión (MPa)

R_{cf} = valor absoluto de la relación entre F_{cf} y la máxima tensión de flexión, f_{cf} , debida a las cargas mayoradas en la mitad del espesor del ala determinante en el punto de empalme, tal como se define en el Artículo 6.13.6.1.4c

f_{ncf} = tensión de flexión debida a las cargas mayoradas en la mitad del espesor del ala no determinante en el punto de empalme concurrente con f_{cf} , positiva si es de tracción y negativa si es de compresión (MPa)

En las Ecuaciones C1 y C2 se sugiere calcular M_{uw} y H_{uw} conservadoramente usando las tensiones en la mitad del espesor de las alas. Al utilizar las tensiones en la mitad del espesor de las alas se pueden utilizar los mismos valores de tensión para diseñar tanto los empalmes en las almas como los empalmes en las alas, lo que simplifica en gran medida los cálculos. Sin embargo, otra alternativa consiste en utilizar las tensiones en las fibras internas de las alas. En cualquiera de los dos casos las tensiones se deben calcular considerando la aplicación de los momentos debidos a las cargas mayoradas apropiadas a las respectivas secciones transversales que soportan dichas cargas. Para satisfacer los requisitos de diseño generales del Artículo 6.13.1, en las Ecuaciones C1 y C2 a la tensión de flexión concurrente en la mitad del espesor del ala no determinante se le aplica el mismo factor que se aplica a la tensión de flexión en el ala determinante. Las definiciones de ala determinante y no determinante se indican en el Artículo 6.13.6.1.4c.

Las tensiones en las Ecuaciones C1 y C2 se deben tomar como magnitudes con signo. Por motivos de conveniencia, en la Ecuación 1 a la diferencia de tensiones resultante se le aplican signos de valor absoluto. En realidad, el signo de M_{uw} corresponde al signo del momento flector para el estado de carga considerado. En la Ecuación C2 H_{uw} se toma como una magnitud con signo, positiva para tracción, negativa para compresión. Para las secciones en las cuales el eje neutro está ubicado a la mitad de la profundidad del alma H_{uw} será igual a cero. Para todas las demás secciones la aplicación conjunta de M_{uw} y H_{uw} dará por resultado una distribución de tensiones equivalente a la distribución no simétrica de tensiones en el alma.

Las Ecuaciones C1 y C2 también se pueden usar para calcular valores de M_{uw} y H_{uw} para utilizar al verificar el deslizamiento de los bulones del alma. Sin embargo, antes se deben realizar los siguientes reemplazos en ambas

ecuaciones:

- reemplazar F_{cf} por la máxima tensión de flexión, f_s , debida a la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II en la mitad del espesor del ala considerada para la menor sección en el punto de empalme,
- reemplazar f_{ncf} por la tensión de flexión, f_{os} , debida a la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II en la mitad del espesor de la otra ala en el punto de empalme concurrente con f_s en el ala considerada, y
- fijar los factores R_h y R_{cf} iguales a 1.0. Para verificar el deslizamiento no es necesario determinar un ala determinante y un ala no determinante. Para las tensiones se deben aplicar las mismas convenciones de signos.

En las zonas sujetas a inversión de tensiones, M_{uw} y H_{uw} se deben calcular independientemente para flexión positiva y negativa a fin de poder identificar la condición determinante. Sólo es necesario calcular M_{uw} y H_{uw} para el estado de cargas que provoca la máxima tensión de flexión en el ala determinante en el Estado Límite de Resistencia o en el ala considerada para la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II.

Sheikh-Ibrahim y Frank (1998, 2001) presentan un enfoque alternativo para las secciones de acero compactas según el cual se supone que la totalidad del momento flector es resistido por los empalmes en las alas, siempre que las alas sean capaces de resistir el momento de diseño. Este método solamente se debe aplicar en el Estado Límite de Resistencia; aun sería necesario verificar el deslizamiento de los bulones usando el enfoque convencional. Si las alas no fueran capaces de resistir la totalidad del momento de diseño, se asume que el empalme del alma resiste el momento flector adicional además del corte de diseño y el momento debido a la excentricidad del corte de diseño.

Para los grupos de bulones sujetos a corte excéntrico, muchas veces se utiliza un enfoque tradicional según el cual se supone que el grupo de bulones está sujeto a un corte concéntrico más un momento respecto del baricentro. Se realiza un análisis vectorial suponiendo que no hay fricción y que las placas y bulones son elásticos (AISC 2001). Es preferible utilizar este enfoque elástico antes que el enfoque basado en la resistencia última indicado en AISC (2001), donde se considera una relación carga-deformación empírica para un bulón individual, ya que de este modo se obtiene un factor de seguridad más consistente.

Para utilizar de manera efectiva el enfoque elástico tradicional para calcular la fuerza resultante máxima en los bulones, todas las acciones se deberían aplicar en la mitad

de la profundidad del alma y el momento de inercia polar del grupo de bulones, I_p , se debería calcular respecto del baricentro de la conexión. Trasladar el momento de inercia polar del grupo de bulones al eje neutro de la sección compuesta, que típicamente no coincide con la mitad de la profundidad del alma, puede hacer que se subestimen las fuerzas en los bulones a menos que la posición del eje neutro se calcule a partir de la sumatoria de las tensiones debidas a las cargas apropiadas actuando sobre las respectivas secciones transversales que soportan las cargas. Por lo tanto, a fin de simplificar los cálculos y evitar posibles errores, se recomienda que para diseñar el empalme todas las acciones calculadas en el alma se consideren aplicadas en la mitad de la profundidad del alma. En este caso, para calcular I_p respecto del baricentro de la conexión se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$I_p = \frac{nm}{12} \left[s^2 (n^2 - 1) + g^2 (m^2 - 1) \right] \quad (\text{C6.13.6.1.4b-3})$$

donde:

m = número de filas verticales de bulones

n = número de bulones en una fila vertical

s = separación vertical (mm)

g = separación horizontal (mm)

Al verificar la resistencia al aplastamiento del alma en los orificios para bulones, la resistencia de uno de los orificios más externo, calculada usando la distancia libre al borde, se puede verificar conservadoramente comparándola contra la máxima fuerza resultante que actúa en el bulón extremo de la conexión. Esta verificación es conservadora, ya que la fuerza resultante actúa en la dirección de una distancia inclinada que es mayor que la distancia libre al borde. En caso que se supere la resistencia al aplastamiento, se recomienda aumentar levemente la distancia al borde en lugar de aumentar el número de bulones o el espesor del alma. Otras opciones serían calcular la resistencia al aplastamiento en base a la distancia inclinada o resolver la fuerza resultante en la dirección paralela a la distancia al borde. En aquellos casos en los cuales la resistencia al aplastamiento de las platabandas del alma sea determinante, para calcular la resistencia al aplastamiento del orificio más externo se puede utilizar el menor valor entre la distancia libre al borde y al extremo en las platabandas.

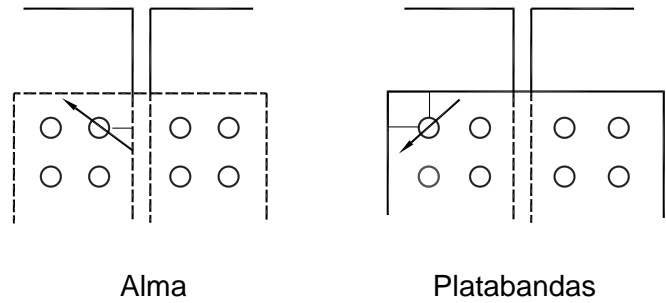


Figura C6.13.6.1.4b-1 Ubicaciones críticas para los orificios más externos

Las platabandas del alma deben ser simétricas a cada lado del alma y deben abarcar tanto como sea posible la totalidad de la profundidad del alma entre las alas sin interferir con las luces necesarias para la colocación de los bulones. Las luces requeridas para los bulones se indican en AISI (2001).

6.13.6.1.4c Empalmes en las alas

En el Estado Límite de Resistencia, las platabandas y sus conexiones en el ala determinante se deberán dimensionar de manera que provean una resistencia mínima tomada como la tensión de diseño, F_{cf} , por la menor área de ala efectiva, A_e , a cualquiera de los lados del empalme, donde F_{cf} se define como:

$$F_{cf} = \frac{\left(\left| \frac{f_{cf}}{R_h} \right| + \alpha \phi_f F_{yf} \right)}{2} \geq 0.75 \alpha \phi_f F_{yf} \quad (6.13.6.1.4c-1)$$

donde:

A_e = área efectiva del ala (mm^2). Para las alas de compresión A_e se deberá tomar como el área bruta del ala. Para las alas de tracción A_e se deberá tomar como:

$$A_e = \left(\frac{\phi_f F_u}{\phi_y F_{yt}} \right) A_n \leq A_g \quad (6.13.6.1.4c-2)$$

donde:

f_{cf} = máxima tensión de flexión debida a las cargas mayoradas a la mitad del espesor del ala determinante en el punto de empalme (MPa)

R_h = factor de hibridez especificado en el Artículo 6.10.1.10.1. Para las secciones híbridas en las cuales F_{cf} no es mayor que la resistencia a la fluencia

C6.13.6.1.4c

La Ecuación 1 define una tensión de diseño que se debe multiplicar por la menor área de ala efectiva a cualquiera de los lados del empalme para determinar una fuerza de diseño para el empalme en el ala determinante en el Estado Límite de Resistencia.

La tensión de diseño se basa en los requisitos generales de diseño especificados en el Artículo 6.13.1. El uso del área de ala efectiva teóricamente asegura que se evitará la fractura en la sección neta del ala de tracción en el empalme. Para determinar la fuerza de diseño en las alas se utiliza la menor de las áreas de ala efectivas, para asegurar así que la fuerza de diseño no supere la resistencia mayorada del ala de menor tamaño.

El ala determinante se define ya sea como el ala superior o el ala inferior para la menor sección en el punto de empalme, cualquiera sea el ala para la cual la relación entre la tensión de flexión elástica a la mitad de su espesor debida a las cargas mayoradas para la condición de carga investigada y su resistencia a la flexión mayorada sea máxima. La otra ala se denomina ala no determinante. En las zonas sujetas a inversión de tensiones el empalme se debe verificar independientemente tanto para flexión positiva como para flexión negativa. Para las secciones compuestas en flexión positiva típicamente el ala determinante es el ala inferior. Para las secciones en flexión negativa cualquiera de las dos alas puede ser el ala determinante.

El factor α de la Ecuación 1 generalmente se toma igual a 1.0, excepto que para las alas en las cuales F_n es menor que F_{yf} se puede utilizar un valor menor igual a la relación entre F_n y F_{yf} . Casos potenciales en los cuales se puede dar esta situación incluyen las alas inferiores de las secciones

mínima especificada del alma, el factor de hibridez se deberá tomar como 1.0.

$\alpha = 1.0$, excepto que para las alas en las cuales F_n es menor que F_{yf} se puede usar un valor menor igual a (F_n/F_{yf})

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

F_n = resistencia nominal a la flexión del ala (MPa)

F_{yf} = mínima resistencia a la fluencia especificada del ala (MPa)

ϕ_u = factor de resistencia para fractura de elementos traccionados como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

ϕ_y = factor de resistencia para fluencia de elementos traccionados como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

A_n = área neta del ala traccionada determinada como se especifica en el Artículo 6.8.3 (mm²)

A_g = área bruta del ala traccionada (mm²)

F_u = mínima resistencia a la tracción especificada del ala traccionada determinada como se especifica en la Tabla 6.4.1-1 (MPa)

F_{yt} = mínima resistencia a la fluencia especificada del ala traccionada (MPa)

Las platabandas y sus conexiones en el ala no determinante en el Estado Límite de Resistencia se deberán dimensionar de manera que provean una resistencia mínima tomada como la tensión de diseño, F_{ncf} , multiplicada por la menor área de ala efectiva, A_e , a cualquiera de los lados del empalme, para lo cual F_{ncf} se define como:

$$F_{ncf} = R_{cf} \left| \frac{f_{ncf}}{R_h} \right| \geq 0.75 \alpha \phi_f F_{yf} \quad (6.13.6.1.4c-3)$$

donde:

R_{cf} = valor absoluto de la relación entre F_{cf} y f_{cf} para el ala determinante

f_{ncf} = tensión de flexión debida a las cargas mayoradas a la mitad del espesor del ala no determinante en el punto de empalme concurrente con f_{cf} (MPa)

doble T_e en compresión o las alas inferiores de las secciones tipo cajón en compresión o tracción en el punto de empalme. En estos casos el valor de F_n calculado para el ala en el empalme puede ser significativamente menor que F_{yf} y en consecuencia sería excesivamente conservador utilizar F_{yf} en la Ecuación 1 para determinar la fuerza de diseño en el ala para diseñar el empalme. Para las alas de las secciones doble T_e en compresión, la reducción de F_n por debajo de F_{yf} típicamente no es tan grande como en el caso de las alas de las secciones tipo cajón. Por lo tanto, por motivos de simplicidad, para este caso se puede utilizar un valor conservador de α igual a 1.0 aun cuando las especificaciones permitirían el uso de un valor menor.

La Ecuación 3 define una tensión de diseño para el ala no determinante en el Estado Límite de Resistencia. En la Ecuación 3, la tensión de flexión a la mitad del espesor del ala no determinante, concurrente con la tensión en el ala determinante, se mayor a en la misma proporción que la tensión de flexión en el ala determinante a fin de satisfacer los requisitos de diseño generales del Artículo 6.13.1. Sin embargo, como mínimo, la tensión mayorada debe ser mayor o igual que $0.75\alpha \phi_f F_{yf}$.

La Ecuación 5 define una tensión de diseño a utilizar para calcular una fuerza de diseño en el ala para verificar el deslizamiento de los bulones bajo la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II dada en la Tabla 4.3.1-1. Debido a que la fractura de la sección neta no es una consideración a tener en cuenta al verificar el deslizamiento bajo esta combinación de cargas, para calcular la fuerza de diseño se utiliza la menor área de ala bruta a cualquiera de los lados del empalme. Para verificar la resistencia al deslizamiento se recomienda utilizar Superficies Clase B, a menos que:

- se hayan aplicado recubrimientos Clase A,
- en la superficie de contacto se haya dejado óxido de hierro sin pintar, o
- el recubrimiento no se haya ensayado adecuadamente para demostrar que satisface los requisitos para ser considerado un revestimiento Clase B.

Debido a que se permite que las alas de las vigas híbridas lleguen a F_{yf} en las Ecuaciones 1, 3 y 5 la tensión de flexión aplicada a la mitad del espesor del ala se divide por el factor de hibridez, R_h , en lugar de reducir F_{yf} aplicando R_h . De hecho, la fluencia en el alma provoca un aumento de la tensión aplicada en el ala. Cuando la tensión de diseño en el ala es menor o igual que la mínima resistencia a la fluencia especificada del alma, R_h se toma igual a 1.0 porque teóricamente no hay fluencia en el alma. Estas ecuaciones no incluyen el factor de balanceo de las cargas del alma, R_b , ya que la presencia de platabandas en

R_h = factor de hibridez especificado en el Artículo 6.10.1.10.1. Para las secciones híbridas en las cuales f_{cf} no es mayor que la resistencia a la fluencia mínima especificada del alma el factor de hibridez se deberá tomar como 1.0.

En el Estado Límite de Resistencia la fuerza de diseño en las platabandas sujetas a tracción no deberá ser mayor que la resistencia mayorada en tracción especificada en el Artículo 6.13.5.2. La fuerza de diseño en las platabandas sujetas a compresión no deberá ser mayor que la resistencia mayorada, R_r , en compresión tomada como:

$$R_r = \phi_c F_y A_s \quad (6.13.6.1.4c-4)$$

donde:

ϕ_c = factor de resistencia para compresión como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada de la platabanda (MPa)

A_s = área bruta de la platabanda (mm²)

Las uniones abulonadas para los empalmes en las alas se deberán diseñar como uniones antideslizantes para la fuerza de diseño del ala. Como mínimo, para verificar el deslizamiento de los bulones utilizados en los empalmes en las alas, la fuerza de diseño para el ala considerada se deberá tomar como la tensión de diseño para la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II, F_s , multiplicada por la menor área de ala a cualquiera de los lados del empalme, tomando F_s como:

$$F_s = \frac{f_s}{R_h} \quad (6.13.6.1.4c-5)$$

donde:

f_s = máxima tensión de flexión debida a Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II a la mitad del espesor del ala considerada para la menor sección en el punto de empalme (MPa)

R_h = factor de hibridez especificado en el Artículo 6.10.1.10.1. Para las secciones híbridas en las cuales f_s en el ala con la mayor tensión no es mayor que la resistencia a la fluencia mínima especificada del alma el factor de hibridez se deberá tomar como 1.0

Si se requieren placas separadoras se deberán aplicar los

el alma elimina la posibilidad que dicha alma sufra pandeo local.

Las platabandas sujetas a tracción se deben verificar para fluencia en la sección bruta, fractura en la sección neta, y rotura de bloque de corte en Estado Límite de Resistencia de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.13.5.2. Generalmente el diseño de las platabandas de dimensiones habituales no es determinado por la rotura de bloque de corte. Las platabandas sujetas a compresión en el Estado Límite de Resistencia se deben verificar solamente para fluencia en la sección bruta de las placas de acuerdo con la Ecuación 4. La Ecuación 4 supone para las platabandas una longitud no arriostrada igual a cero.

Para un empalme en un ala con platabandas interiores y exteriores, si las áreas de las placas interiores y exteriores no difieren en más de 10 por ciento se puede asumir que la fuerza de diseño en el Estado Límite de Resistencia se distribuye igualmente a las placas internas y externas y a sus conexiones. Para este caso las conexiones se deberían dimensionar suponiendo dos planos de corte. En cambio, si las áreas de las placas interiores y exteriores difieren en más de 10 por ciento, la fuerza de diseño en cada platabanda y su conexión en el Estado Límite de Resistencia se debería determinar multiplicando la fuerza de diseño en el ala por la relación entre el área de la platabanda considerada y el área total de las platabandas interiores y exteriores. Para este caso la resistencia al corte de la conexión se debería verificar para la máxima fuerza calculada en la platabanda actuando en un único plano de corte. Para verificar el deslizamiento de la conexión para un empalme de ala en el cual las platabandas interiores y exteriores son diferentes, la resistencia al deslizamiento siempre se debería determinar repartiendo la fuerza de diseño del ala igualmente entre los dos planos de corte, independientemente de la relación entre las áreas de las platabandas. No es posible que se produzca deslizamiento de la conexión a menos que se produzca deslizamiento en ambos planos.

Para las secciones tipo cajón mencionadas en este artículo, las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal pueden ser significativas bajo condiciones constructivas y de servicio, y por lo tanto deben ser consideradas al verificar las conexiones de los empalmes abulonados de las alas para deslizamiento y fatiga. En estos casos, típicamente las tensiones de alabeo se pueden ignorar al verificar los empalmes en un ala superior una vez que dicha ala tiene apoyo lateral continuo. Las tensiones de alabeo también se pueden ignorar al verificar empalmes tanto en el ala superior como en el ala inferior en el Estado Límite de Resistencia. Para estas secciones también se debe considerar la tensión de corte por torsión de Saint-Venant al diseñar empalmes abulonados para las alas de las secciones tipo cajón en todos los estados

requisitos del Artículo 6.13.6.1.5.

Para las secciones tipo cajón simple, y para las secciones tipo cajón múltiple en puentes que no satisfacen los requisitos del Artículo 6.11.2.3 o con alas que no son totalmente efectivas de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.11.1.1, se deberán considerar las tensiones de alabeo longitudinales debidas a la distorsión de la sección transversal al verificar los empalmes abulonados en las alas para deslizamiento y fatiga. En el Estado Límite de Resistencia se podrán ignorar las tensiones de alabeo longitudinales. Al diseñar empalmes abulonados para las alas de estas secciones, en todos los estados límites se deberá considerar el corte por torsión de Saint-Venant.

Cuando corresponda, al diseñar los empalmes abulonados en las alas se deberán considerar los efectos de la flexión lateral en las alas superiores de las secciones tipo omega invertida con arriostramiento discreto y en las alas de secciones doble Te con arriostramiento discreto.

límites. Típicamente los cortes por torsión de Saint-Venant se desprecian en las alas superiores de las secciones tipo omega invertida una vez que las alas tienen apoyo lateral continuo. Los bulones para los empalmes en las alas de las secciones tipo cajón se pueden diseñar para los efectos del corte torsional usando el método vectorial elástico tradicional que típicamente se aplica para el diseño de empalmes en las almas. Dependiendo del estado límite investigado, se supone que el corte en el grupo de bulones del ala es provocado ya sea por la fuerza en el ala debida a las cargas mayoradas o por la fuerza de diseño apropiada del ala, según corresponda. El momento en el grupo de bulones se toma como el momento resultante de la excentricidad del corte por torsión de Saint-Venant debido a las cargas mayoradas, supuesto aplicado en el eje del empalme. En el Estado Límite de Resistencia se debería usar un corte torsional de diseño, que se puede tomar como el corte torsional debido a las cargas mayoradas multiplicado por el factor, R_{cf} , de la Ecuación 3. En estos casos las platabandas de las alas de las secciones tipo cajón también se deberían diseñar en el Estado Límite de Resistencia para los efectos combinados del corte de diseño y momento de diseño calculados actuando sobre el grupo de bulones.

En aquellos casos en los cuales se considera que la flexión lateral de las alas es significativa, es necesario considerar los efectos de la flexión lateral en el diseño de los empalmes abulonados para las alas superiores arriostradas discretamente de las secciones tipo omega invertida o las alas de las secciones doble Te arriostradas discretamente. En estos casos también se puede usar el método vectorial elástico tradicional para tomar en cuenta los efectos de la flexión lateral de las alas en el diseño de los bulones del empalme. Se supone que el corte en el grupo de bulones del ala es provocado por la fuerza del ala, calculada como se describe en el párrafo precedente. La fuerza del ala se calcula sin considerar la flexión lateral del ala. El momento en el grupo de bulones se toma como el momento de flexión lateral del ala debido a las cargas mayoradas. En el Estado Límite de Resistencia se debería usar un momento de flexión lateral de diseño, que se puede tomar como el momento de flexión lateral debido a las cargas mayoradas multiplicado por el factor R_{cf} de la Ecuación 3. Las platabandas sujetas a flexión lateral del ala también se deberían diseñar en el Estado Límite de Resistencia para los efectos combinados del corte de diseño y el momento de diseño calculados actuando sobre el grupo de bulones. También se puede ignorar la flexión lateral de las alas al diseñar los empalmes en un ala superior una vez que dicha ala tiene apoyo lateral continuo.

6.13.6.1.5 Separadores

Cuando hay bulones que soportan carga atravesando separadores de un espesor mayor o igual que 6.0 mm en una unión cargada axialmente, incluyendo los empalmes en las alas de las vigas:

- Los separadores se deberán prolongar más allá del material de las placas de empalme o platabandas, y la prolongación se deberá asegurar usando una cantidad de bulones adicionales suficiente para distribuir la tensión total en el elemento uniformemente sobre la sección combinada del elemento y el separador, o bien
- A modo de alternativa, no es necesario prolongar y desarrollar los separadores siempre que la resistencia mayorada de los bulones en corte en el Estado Límite de Resistencia, especificada en el Artículo 6.13.2.2, se reduzca aplicando el siguiente factor:

$$R = \left[\frac{(1 + \gamma)}{(1 + 2\gamma)} \right] \quad (6.13.6.1.5-1)$$

donde:

$$\gamma = \frac{A_f}{A_p}$$

A_f = sumatoria del área de los separadores en la parte superior e inferior de la placa conectada (mm²)

A_p = menor valor entre el área de la placa conectada y la sumatoria del área de las platabandas en la parte superior e inferior de la placa conectada (mm²)

Para las uniones antideslizantes, la resistencia al deslizamiento mayorada de un bulón para la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II, especificada en el Artículo 6.13.2.2, no se deberá ajustar para considerar el efecto de los separadores.

A menos que el Ingeniero apruebe una configuración diferente, los separadores de un espesor mayor o igual que 6.0 mm deberán consistir en no más de dos placas.

Para los empalmes abulonados en las almas en los cuales la diferencia de espesor es de 2.0 mm o menos no se requieren placas separadoras.

La resistencia a la fluencia mínima especificada de los separadores de un espesor mayor o igual que 6.0 mm no debería ser menor que 70 por ciento de la resistencia a la fluencia mínima especificada de la placa conectada o 250 MPa, cualquiera sea el valor que resulte menor.

C6.13.6.1.5

Los separadores se deben asegurar usando sujetadores adicionales, de manera que en el Estado Límite de Resistencia los mismos efectivamente sean una parte integral de un componente conectado para resistir el corte. Como resultado de esta unión integral se obtienen planos de corte bien definidos y no se reduce la resistencia al corte mayorada de los bulones.

En lugar de prolongar y desarrollar los separadores, otra opción consiste en aplicar el factor de reducción dado por la Ecuación 1 a la resistencia mayorada de los bulones en corte. Este factor compensa la reducción de la resistencia nominal de un bulón que provoca la flexión del bulón, y típicamente hará que sea necesario proveer bulones adicionales en la unión. El factor de reducción solo se debe aplicar del lado de la conexión donde se encuentran los separadores. El factor de la Ecuación 1 fue desarrollado matemáticamente (*Sheikh-Ibrahim 2002*) y verificado por comparación con los resultados de un programa experimental sobre empalmes abulonados cargados axialmente con separadores no desarrollados (*Yura et al, 1982*). Este factor es más general que un factor similar dado en AISC (1999), ya que toma en cuenta las áreas de la placa conectada principal, las platabandas y los separadores, y se puede aplicar a separadores de cualquier espesor. A diferencia del factor empírico de AISC, el factor dado por la Ecuación 1 típicamente será menor que 1.0 para las conexiones que utilizan separadores de 6.0 mm de espesor para asegurar tanto una resistencia al corte adecuada como una deformación limitada de la conexión.

Para las uniones antideslizantes, no es necesario ajustar la resistencia mayorada al deslizamiento de un bulón para la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II a fin de considerar el efecto de los separadores. La resistencia al deslizamiento entre el separador y cualquiera de las partes conectadas es comparable a la que existiría entre las partes conectadas si no se utilizara ningún separador.

Para los separadores de espesor mayor o igual que 6.0 mm en uniones abulonadas cargadas axialmente, la resistencia a la fluencia mínima especificada de los separadores teóricamente debería ser mayor o igual que la resistencia a la fluencia mínima especificada de la placa conectada multiplicada por el factor $[1/(1+\gamma)]$ a fin de proveer separadores completamente desarrollados que actúen de forma integral con la placa conectada. Sin embargo, es posible que este requisito no resulte práctico ni conveniente por motivos relacionados con la disponibilidad de los materiales. En consecuencia, en algunos casos en Estado Límite de Resistencia se puede producir fluencia prematura de los separadores, flexión de los bulones y mayor deformación de la conexión. Para controlar la

excesiva deformación de la conexión, para el caso de los separadores de espesor mayor o igual que 6.0 mm se recomienda un límite inferior para la resistencia a la fluencia mínima especificada del material de los separadores. Las conexiones en las cuales los separadores se prolongan y desarrollan correctamente o aquellas en las cuales en lugar de prolongar los separadores se proveen bulones adicionales de acuerdo con la Ecuación 1 pero que no satisfacen el límite recomendado para la resistencia a la fluencia aún tendrán una adecuada reserva de reserva al corte en los bulones. Sin embargo, estas conexiones tendrán una mayor probabilidad de sufrir mayores deformaciones en el Estado Límite de Resistencia. Para los separadores de espesor menor que 6.0 mm los efectos de la fluencia de los separadores y la deformación de la conexión se consideran despreciables. Para las aplicaciones que involucran el uso de aceros autoprotegidos, para las placas separadoras se debería especificar un material de grado autoprotegido.

6.13.6.3 Empalmes soldados

El diseño y los detalles de los empalmes soldados deberán satisfacer los requisitos de la edición más reciente del Código para Soldadura de Puentes *AASHTO/AWS D1.5M/ D1.5* y los siguientes requisitos aquí especificados.

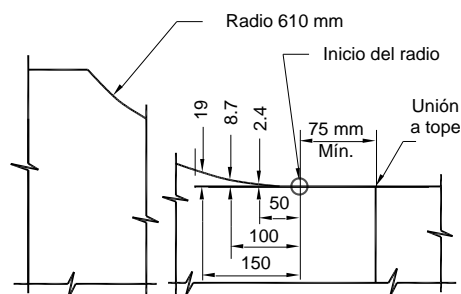
Los empalmes soldados se deberán diseñar para resistir el momento, el corte o la fuerza axial de diseño especificados en el Artículo 6.13.1. Los elementos traccionados y comprimidos se pueden empalmar mediante empalmes a tope de penetración total; se deberán evitar las platabandas.

Los empalmes soldados en obra se deben disponer de manera de minimizar la soldadura aérea.

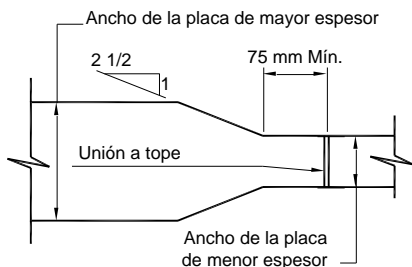
Los materiales de diferente ancho empalmados mediante soldaduras a tope deberán tener transiciones simétricas de acuerdo con la Figura 1. El tipo de transición seleccionada deberá ser consistente con las categorías para diseño a fatiga indicadas en la Tabla 6.6.1.2.3-1 para el empalme con soldadura de ranura usada en el elemento. La documentación técnica deberá especificar que los empalmes a tope usados para conectar materiales de diferente espesor se deberán amolar hasta lograr una pendiente uniforme entre las diferentes superficies, incluyendo la soldadura, de no más de 1 en 2.5.

C6.13.6.3

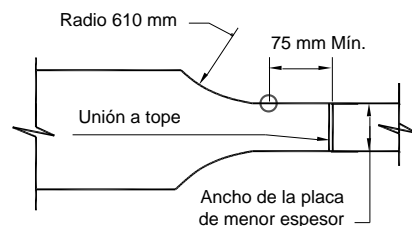
Los detalles de la transición del ancho de las alas típicamente muestran que la transición comienza en el empalme a tope. La Figura 1 muestra un detalle preferido, en el cual el empalme está ubicado como mínimo a 75 mm de la transición para facilitar la colocación de pestañas sobrantes. Siempre que sea posible, para las piezas que han de ser transportadas se prefieren las alas de ancho constante.



(a) Detalle de la transición del ancho



(b) Transición recta



(c) Transición de 610 mm de radio

Figura 6.13.6.2-1 Detalles de los empalmes**6.13.7 Conexiones de los pórticos rígidos****6.13.7.1 Disposiciones generales**

Todas las conexiones de los pórticos rígidos se deberán diseñar para resistir los momentos, cortes y fuerzas axiales debidos a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia.

6.13.7.2 Almas

El espesor del alma de una viga no rigidizada deberá satisfacer:

$$t_w \geq \sqrt{3} \left(\frac{M_c}{\phi_v F_y d_b d_c} \right) \quad (6.13.7.2-1)$$

donde:

C6.13.7.1

Los requisitos que se aplican para las conexiones de los pórticos rígidos están bien documentados en el Capítulo 8 de ASCE (1971).

La rigidez es fundamental para la continuidad supuesta como base para el diseño.

6.13.7.2

F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del alma (MPa)

M_c = momento de columna debido a las cargas mayoradas (N-mm)

d_b = profundidad de la viga (mm)

d_c = profundidad de la columna (mm)

ϕ_v = factor de resistencia para corte como se especifica en el Artículo 6.5.4.2

Cuando el espesor del alma en la conexión es menor que el valor dado por la Ecuación 1, el alma se deberá reforzar usando rigidizadores diagonales o una placa de refuerzo en contacto con el alma sobre el área de la conexión.

En las uniones donde las alas de un elemento se conectan rígidamente al ala de otro elemento, se deberán proveer rigidizadores en el alma del segundo elemento en una ubicación opuesta al ala de compresión del primer elemento donde:

$$t_w < \frac{A_f}{t_b + 5k} \quad (6.13.7.2-2)$$

y en una ubicación opuesta al ala de tracción del primer elemento donde:

$$t_c < 0.4\sqrt{A_f} \quad (6.13.7.2-3)$$

donde:

t_w = espesor del alma a rigidizar (mm)

k = distancia entre la cara exterior del ala y el talón del chaflán del alma de un elemento a rigidizar (mm)

t_b = espesor del ala que transmite la fuerza concentrada (mm)

t_c = espesor del ala del elemento a rigidizar (mm)

A_f = área del ala que transmite una carga concentrada (mm²)

6.14 REQUISITOS PARA DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS

6.14.1 Puentes de vigas con tablero inferior

El requisito de verificar la viga o alma en la conexión asegura que la conexión del pórtico de acero tenga una resistencia adecuada.

En las estructuras de puentes los rigidizadores diagonales de espesor mínimo proveerán rigidez suficiente. Otra alternativa consiste en aumentar el espesor del alma en la zona de la conexión.

La intención de los requisitos que establecen la necesidad de investigar un elemento sujeto a fuerzas concentradas aplicadas a su ala por las alas de otro elemento que se conectan al mismo es evitar la abolladura del alma y la distorsión del ala. Proveer rigidizadores de un espesor igual al de las alas del otro elemento es una práctica conservadora.

C6.14.1

Cuando las vigas constituyan los elementos principales de un puente de vigas con tablero inferior, dichos elementos se deberán rigidizar contra la deformación lateral mediante placas de empalme o esquineras de alma maciza conectadas a los rigidizadores de los elementos principales y las vigas de tablero. El diseño de las placas de empalme deberá satisfacer los requisitos del Artículo 6.14.2.8.

6.14.2 Celosías

6.14.2.1 Disposiciones generales

Los montantes extremos de las celosías deberían ser inclinados. Las juntas entre el cordón superior y el montante extremo inclinado deberán tener apoyo lateral.

La separación entre los centros de las celosías principales deberá ser suficiente para evitar el vuelco.

Las profundidades efectivas de la celosía se deberán tomar de la siguiente manera:

- La distancia entre los centros de gravedad de los cordones abulonados, y
- La distancia entre los centros de las articulaciones.

6.14.2.2 Elementos de las celosías

Los elementos deberán ser simétricos respecto del plano central de la celosía.

Si la forma de la celosía lo permite, los cordones de compresión deberán ser continuos.

Si los elementos del alma están sujetos a inversión de tensiones, las conexiones de sus extremos no deberán ser articuladas.

Se deberían evitar las contradiagonales auxiliares o diagonales de contratensión.

6.14.2.3 Tensiones secundarias

Este requisito se puede combinar con otros requisitos sobre rigidización de placas.

C6.14.2.2

Los cordones y montantes de las celosías generalmente deberían estar compuestos por elementos en forma de H, en forma de U o en forma de cajón. El elemento o componente puede ser un perfil laminado o un perfil fabricado usando soldaduras o sujetadores mecánicos. Las placas o componentes laterales deberían ser macizos. Los cubrejuntas o placas de alma pueden ser macizos o perforados.

En los cordones formados por perfiles angulares en elementos de sección en forma de U, preferentemente las ramas verticales de los perfiles deberían estar hacia abajo.

Algunas veces en las celosías livianas se utilizan contradiagonales auxiliares o diagonales de contratensión como elementos de alma.

Las contradiagonales auxiliares o diagonales de contratensión deberían ser rígidas. En caso de utilizarlas, las contradiagonales auxiliares o diagonales de contratensión deberían tener tensores abiertos, y en el diseño de estos elementos se deberá considerar un incremento de 70.0 MPa para considerar la tensión inicial. En cualquier panel solamente un conjunto de diagonales debería ser ajustable. No se deberían utilizar tensores de tuerca ni barras de ajuste. El factor de carga para la tensión inicial se debería tomar igual a 1.0.

El diseño y los detalles deberán ser tales que las tensiones secundarias sean tan pequeñas como sea posible. Se deberán considerar las tensiones debidas al momento por carga permanente del elemento, así como aquellas provocadas por la excentricidad de las uniones o líneas de trabajo. En los elementos cuyo ancho, medido en forma paralela al plano de distorsión, sea menor que un décimo de su longitud no será necesario considerar las tensiones secundarias debidas a la distorsión de las celosías o la deflexión de las vigas de tablero.

6.14.2.4 Diafragmas

En las celosías se deberán proveer diafragmas de acuerdo con los requisitos especificados en el Artículo 6.7.4.4.

6.14.2.5 Contraflecha

La longitud de los elementos de las celosías se deberá ajustar de manera tal que la contraflecha sea mayor o igual que la deflexión provocada por la carga permanente.

Para calcular las deflexiones de las celosías se deberá usar el área bruta de cada uno de sus elementos. Si se utilizan placas perforadas, el área efectiva de la placa perforada se deberá calcular como el volumen neto entre los centros de las perforaciones dividido por la longitud entre los centros de las perforaciones.

Los requisitos de diseño para las placas perforadas deberán satisfacer los requisitos especificados en los Artículos 6.8.5.2 y 6.9.4.3.2.

6.14.2.6 Líneas de trabajo y ejes de gravedad

Los elementos principales se deberán dimensionar de manera que en lo posible sus ejes de gravedad coincidan con el centro de la sección.

En los elementos comprimidos de las secciones no simétricas, como por ejemplo en los cordones cuya sección está formada por segmentos laterales y un cubrejuntas, en lo posible el eje de gravedad de la sección deberá coincidir con la línea de trabajo, excepto que se podrá introducir excentricidad para contrarrestar la flexión debida a la carga permanente. En los cordones inferiores o elementos diagonales formados por dos perfiles angulares, la línea de trabajo se puede tomar como la línea de calibre más próxima a la parte posterior del perfil o, en el caso de las celosías soldadas, en el centro de gravedad.

6.14.2.7 Arriostramiento transversal y contravientos

6.14.2.7.1 Disposiciones generales

Se deberá investigar la necesidad de utilizar marcos transversales en las celosías como arriostramiento transversal. Cualquier análisis estructural consistente con o sin arriostramiento transversal intermedio será aceptable, siempre que se satisfagan las condiciones de equilibrio, compatibilidad y estabilidad para todos los estados límites aplicables.

6.14.2.7.2 Puentes de celosía con tablero inferior

Los puentes de vigas con tablero inferior deberán tener contravientos o bien se deberá demostrar que la resistencia y la rigidez del sistema de celosía sin contravientos son adecuadas. Si se utilizan contravientos, estos deberían ser de tipo doble plano o cajón, estar rígidamente conectados al montante extremo y a las alas del cordón superior, y ser tan profundos como sea posible. Si se utiliza un contraviento de un solo plano, éste debería estar ubicado en el plano transversal central de los montantes extremos, con diafragmas entre las almas de los montantes para permitir una distribución de las tensiones del contraviento.

El contraviento, con o sin arriostramiento, se deberá diseñar para que tome la totalidad de la reacción del sistema lateral del cordón superior, y los montantes de extremo se deberán diseñar para transferir esta reacción a los apoyos de la celosía.

6.14.2.7.3 Puentes de celosía con tablero superior

Los puentes de celosía con tablero superior deberán tener arriostramiento transversal en el plano de los montantes extremos, o bien se deberá demostrar que la resistencia y los rigidizadores del sistema de celosía son adecuados. Cuando se utilice arriostramiento transversal, éste se deberá extender en la totalidad de la profundidad de las celosías por debajo del sistema de piso, y el arriostramiento transversal del extremo se deberá dimensionar para que soporte la totalidad de la carga lateral superior hacia los apoyos a través de los montantes extremos de la celosía.

6.14.2.8 Placas de empalme

Se deberán aplicar los requisitos de los Artículos 6.13.4 y 6.13.5, según corresponda.

Para los elementos principales se deberían utilizar placas de empalme o placas de unión, excepto cuando los elementos estén conectados mediante una articulación. En tanto sea posible, los sujetadores que conectan cada elemento deberán ser simétricos respecto del eje del elemento, y se debería considerar desarrollar completamente los componentes del elemento.

Excepto las curvas incluidas exclusivamente con fines

C6.14.2.7.3

En general resulta sencillo disponer un arriostramiento transversal de toda la profundidad en estos puentes, por lo cual se recomienda su uso.

C6.14.2.8

Las placas de empalme se pueden diseñar para a corte, flexión y esfuerzo axial usando el método convencional o métodos basados en modelos continuos.

estéticos, siempre que sea posible se deberían evitar los cortes reentrantes.

La máxima tensión debida a la combinación de cargas de flexión y cargas axiales mayoradas no deberá ser mayor que $\phi_f F_y$ en base al área bruta.

La máxima tensión de corte en una sección debida a las cargas mayoradas deberá ser $\phi_v F_u / \sqrt{3}$ para corte uniforme y $\phi_v 0.74 F_u / \sqrt{3}$ para corte flexional calculado como la fuerza de corte mayorada dividida por el área de corte.

Si la longitud del borde no apoyado de una placa de empalme es mayor que $2.06(E/F_y)^{1/2}$ por su espesor, dicho borde se deberá rigidizar. Los bordes de las placas de empalme rigidizados y no rigidizados se deberán investigar como secciones de columna idealizadas.

6.14.2.9 Puentes de armadura rebajada

En los puentes de armadura rebajada, los elementos verticales de las celosías y las vigas de tablero y sus conexiones se deberán dimensionar para resistir una fuerza lateral no menor que 4.38 N/mm aplicada en los puntos de panel del cordón superior de cada celosía, considerada como una carga permanente para la Combinación de Cargas para Estado Límite de Resistencia I y mayorada según corresponda.

El cordón superior se deberá considerar como una columna con apoyos laterales elásticos en los puntos de panel.

6.14.2.10 Resistencia mayorada

La resistencia mayorada de los elementos traccionados deberá satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.8.2.

La resistencia mayorada de los elementos comprimidos deberá satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 6.9.2.

La resistencia nominal a la flexión de los elementos cuya resistencia mayorada es determinada mediante ecuaciones de interacción, especificadas en los Artículos 6.8.2.3 o 6.9.2.2, se deberá evaluar como se especifica en el Artículo 6.12.

6.14.3 Superestructuras con tableros ortótropos

No se deberían utilizar factores de forma ni otros parámetros que impliquen la plastificación de la sección transversal.

C6.14.2.9

Timoshenko y Gere (1961) y Galambos (1998) discuten el análisis del pandeo de columnas con apoyos laterales elásticos.

C6.14.3

Las calzadas que constituyen tableros ortótropos pueden ser utilizadas como alas superiores o inferiores de los puentes de celosía, vigas placas o vigas cajón; como elementos rigidizadores de los puentes suspendidos o atirantados; como tirantes de los puentes de arco; etc.

El Artículo 9.8.3 incluye requisitos detallados para el diseño de los tableros ortótropos.

6.14.3.1 Disposiciones generales

Los requisitos de este artículo se deberán aplicar al diseño de puentes de acero que utilizan una placa de acero rigidizada como tablero.

Un tablero ortótropo se deberá considerar parte integral de la superestructura del puente y deberá participar para resistir las solicitaciones globales que actúan sobre el puente. Las uniones entre el tablero y los elementos estructurales principales se deberán diseñar para los efectos de interacción especificados en el Artículo 9.4.1.

Al analizar las vigas de los puentes de vigas tipo cajón con tablero ortótropo se deberán considerar los efectos de las distorsiones por torsión de la geometría de la sección transversal.

6.14.3.2 Ancho efectivo del tablero

Se deberán aplicar los requisitos del Artículo 4.6.2.6.4.

6.14.3.3 Superposición de efectos globales y locales

6.14.3.3.1 Disposiciones generales

Al calcular las solicitaciones extremas en el tablero se deberán superponer los efectos globales y los locales. Estas solicitaciones combinadas se deberán calcular para la misma configuración y posición de las sobrecargas.

6.14.3.3.2 Tableros en tracción global

La resistencia mayorada de los tableros sujetos a tracción global, P_u , debida a las cargas mayoradas con corte global simultáneo combinados con flexión local deberá satisfacer:

$$\frac{P_u}{P_r} + \frac{M_{ur}}{M_{rr}} \leq 1.33 \quad (6.14.3.3.2-1)$$

donde:

$$P_u = A_{d,eff} \left(f_g^2 + 3f_{vg}^2 \right)^{0.5} \quad (6.14.3.3.2-2)$$

donde:

f_g = tensión axial global en el tablero (MPa)

f_{vg} = tensión de corte global simultáneo en el tablero (MPa)

$A_{d,eff}$ = área efectiva de la sección transversal del tablero,

C6.14.3.3.2

La reducción de las solicitaciones locales y globales superpuestas se justifica por la baja probabilidad de que la máxima solicitación de tracción local ocurra en forma simultánea con la máxima tracción global, además de la gran capacidad que tienen los tableros ortótropos para soportar sobrecargas locales.

Si actúan simultáneamente con las solicitaciones de tracción global, las solicitaciones de corte global en los tableros ortótropos aumentarán la tracción determinante en el tablero. Esto se puede evaluar aplicando el criterio de fluencia de Huber-Mises usado para definir la solicitación de tracción total en la Ecuación 2. El efecto del corte simultáneo generalmente no es significativo en los tableros ortótropos de los puentes de viga o celosía, pero puede ser importante en los tableros usados como montantes traccionados en puentes de arco o atirantados.

incluyendo los nervios longitudinales (mm^2)

P_r = resistencia nominal a la tracción del tablero, considerando el ancho efectivo del tablero (N)

M_{ur} = momento de flexión local en un nervio longitudinal debido a las cargas mayoradas (N-mm)

M_{rr} = resistencia a la flexión de un nervio longitudinal, determinada al llegar la fibra extrema a la fluencia (N-mm)

6.14.3.3.3 Tableros en compresión global

A menos que se pueda demostrar mediante un análisis riguroso que no se producirá pandeo global del tablero como resultado de la combinación de la compresión global con las fuerzas de compresión por flexión local en los nervios longitudinales, los nervios longitudinales, incluyendo el ancho efectivo de la placa de tablero, se deberán diseñar como columnas individuales supuestas simplemente apoyadas en las vigas transversales.

C6.14.3.3.3

La estabilidad elástica de los nervios de los tableros ortótropos bajo cargas combinadas se puede evaluar usando las fórmulas contenidas en el Apéndice II de Wolchuk (1963).

6.14.3.4 Flexión transversal

Las resistencias al momento mayoradas de las vigas transversales y la placa de tablero deberán ser tales que:

$$\frac{M_{fb}}{M_{rb}} + \frac{M_{ft}}{M_{rt}} \leq 1.0 \quad (6.14.3.4-1)$$

donde:

M_{fb} = momento aplicado debido a las cargas mayoradas en una viga transversal (N-mm)

M_{rb} = resistencia al momento mayorada de una viga transversal (N-mm)

M_{ft} = momento transversal aplicado debido a las cargas mayoradas que actúan en la placa de tablero como resultado de que la placa transmite las cargas de rueda a los nervios longitudinales adyacentes (N-mm)

M_{rt} = resistencia al momento mayorada de la placa de tablero que transmite las cargas de rueda a los nervios adyacentes (N-mm)

Para configuraciones de tablero en las cuales la separación de las vigas transversales es mayor o igual que tres veces la separación entre las almas de los nervios longitudinales se puede omitir el segundo término de la Ecuación 1.

6.14.3.5 Diafragmas

Se deberán proveer diafragmas o marcos transversales en todos los apoyos, y éstos deberán tener suficiente rigidez y resistencia para transmitir las fuerzas laterales a los apoyos y para resistir la rotación transversal, el desplazamiento y la distorsión. Se deberán proveer diafragmas o marcos transversales consistentes con el análisis de las vigas, y éstos deberán tener suficiente rigidez y resistencia para resistir las distorsiones transversales.

6.14.4 Arcos de alma maciza

6.14.4.1 Amplificación de momentos para considerar las flechas

Para la amplificación de los momentos se deberán satisfacer los requisitos especificados en el Artículo 4.5.3.2.2c.

6.14.4.2 Esbeltez de las almas

La esbeltez de las almas de los nervios de los arcos deberá satisfacer la siguiente expresión:

$$\frac{D}{t_w} \leq k \sqrt{\frac{E}{f_a}} \quad (6.14.4.2-1)$$

donde:

f_a = tensión axial debida a las cargas mayoradas (MPa)

k = factor de estabilidad de placas especificado en la Tabla 1

Tabla 6.14.4.2-1 Esbeltez de placa de los arcos

| CONDICIÓN | k | I_s |
|----------------------------------|------|----------------------|
| Sin rigidizador longitudinal | 1.25 | — |
| Un rigidizador longitudinal | 1.88 | $I_s = 0.75 D t_w^3$ |
| Dos rigidizadores longitudinales | 2.51 | $I_s = 2.2 D t_w^3$ |

El momento de inercia de los rigidizadores respecto de un eje paralelo al alma en la base del rigidizador no deberá ser menor que lo especificado en la Tabla 1.

La relación entre el ancho y el espesor de los rigidizadores deberá satisfacer la siguiente expresión:

$$\frac{b}{t_s} \leq 0.048 \sqrt{\frac{E}{f_a + \frac{f_b}{3}}} \leq 12 \quad (6.14.4.2-2)$$

donde:

f_b = máxima tensión debida a las cargas mayoradas

6.14.4.3 Estabilidad de las alas

La relación entre el ancho y el espesor de las alas deberá satisfacer la siguiente expresión:

- Para el ancho entre las almas:

$$\frac{b}{t} \leq 1.06 \sqrt{\frac{E}{f_a + f_b}} \quad (6.14.4.3-1)$$

- Para los anchos de los vuelos:

$$\frac{b}{t} \leq 0.408 \sqrt{\frac{E}{f_a + f_b}} \leq 12 \quad (6.14.4.3-2)$$

6.15 PILOTES

6.15.1 Disposiciones generales

Los pilotes se deberán diseñar como elementos estructurales capaces de soportar todas las cargas impuestas de forma segura.

En el caso de un grupo de pilotes compuesto exclusivamente por pilotes verticales y sujeto a una carga lateral, el análisis estructural de los pilotes deberá considerar explícitamente los efectos de la interacción suelo-estructura como se especifica en el Artículo 10.7.3.11.

6.15.2 Resistencia estructural

Los factores de resistencia, ϕ_c y ϕ_f , para el Estado Límite de Resistencia se deberán tomar como se especifica en el Artículo 6.5.4.2. Los factores de resistencia para resistencia axial de los pilotes comprimidos que están sujetos a daños debido al hincado se deberán aplicar solamente a las secciones del pilote que probablemente experimentarán daños. Por lo tanto, los factores ϕ_c para resistencia axial iguales a 0.50 y 0.70 especificados para pilotes en compresión sin flexión se deberán aplicar solamente a la capacidad axial del pilote. Los factores ϕ_c iguales a 0.70 y 0.80 y el factor ϕ_f igual a 1.00 se deberán aplicar a la resistencia combinada a carga axial y flexión del pilote en la ecuación de interacción para los términos de compresión y

C6.15.1

Típicamente, debido a la falta de un análisis de interacción suelo-estructura detallada para los grupos de pilotes que contienen pilotes tanto verticales como inclinados, la combinación de cargas axiales y de flexión solo se aplica a los grupos de pilotes que solamente contienen pilotes verticales.

C6.15.2

Debido a la naturaleza del hincado de los pilotes, al seleccionar los factores de resistencia es necesario considerar factores adicionales que normalmente no se toman en cuenta en los elementos de acero. Los factores considerados al desarrollar los factores de resistencia especificados incluyen:

- La excentricidad no intencional de la carga aplicada respecto del eje del pilote,
- Las variaciones de las propiedades materiales del pilote, y

flexión, respectivamente.

- Los daños que puede sufrir el pilote debido al hincado.

Estos factores se discuten en Davisson (1983). Aunque los factores de resistencia aquí especificados generalmente cumplen con las recomendaciones dadas por Davisson (1983), éstos han sido modificados para reflejar la filosofía de diseño actual.

La resistencia a la compresión mayorada, P_r , incluye factores de reducción para considerar excentricidades no intencionales de las cargas y variaciones en las propiedades de los materiales, además de una reducción para considerar el potencial daño que pueden sufrir los pilotes durante su hincado, que más probablemente ocurrirá cerca de la punta del pilote. Los factores de resistencia para calcular la capacidad de punta mayorada cerca de la punta del pilote son 0.50 a 0.60 y 0.60 a 0.70 para condiciones de hincado adversas y buenas, respectivamente. Estos factores incluyen un factor de resistencia a la compresión axial ϕ_c igual a 0.90, modificado aplicando factores de reducción iguales a 0.78 y 0.87 para carga excéntrica en pilotes en H y pilotes en forma de tubo, respectivamente, y factores de reducción iguales a 0.75 y 0.875 para condiciones de hincado difíciles y moderadamente difíciles.

En los pilotes de acero, la flexión ocurre fundamentalmente hacia la cabeza del pilote. Es menos probable que esta zona superior del pilote sufra daños durante el hincado. Por lo tanto, en relación con la combinación de compresión axial y flexión, el rango del factor de resistencia para resistencia axial $\phi_c = 0.70$ a 0.80 toma en cuenta tanto la excentricidad no intencional de la carga como las variaciones de las propiedades de los materiales del pilote, mientras que el factor de resistencia para resistencia a la flexión $\phi_f = 1.00$ toma en cuenta solamente la resistencia básica a la flexión. Este enfoque de diseño se ilustra en la Figura C1, la cual muestra la profundidad hasta el empotramiento determinado mediante un análisis P- Δ .

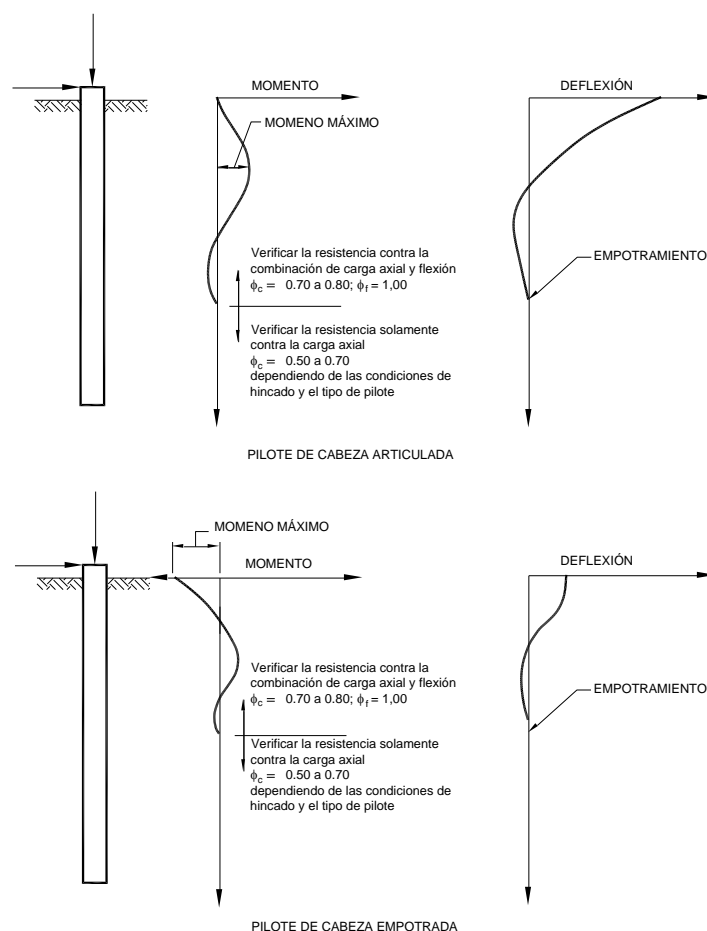


Figura C6.15.2-1 Distribución del momento y la deflexión en pilotes verticales sujetos a cargas laterales

6.15.3 Resistencia a la compresión

6.15.3.1 Resistencia a la compresión axial

Para los pilotes bajo carga axial, la resistencia mayorada de los pilotes en compresión, P_r , se deberá tomar como se especifica en el Artículo 6.9.2.1 usando el factor de resistencia, ϕ_c , especificado en el Artículo 6.5.4.2.

6.15.3.2 Combinación de compresión axial y flexión

Los pilotes sujetos a carga axial y flexión se deberán diseñar de acuerdo con el Artículo 6.9.2.2 usando los factores de resistencia, ϕ_c y ϕ_f , especificados en el Artículo 6.5.4.2.

6.15.3.3 Pandeo

La inestabilidad de los pilotes que atraviesan agua o aire se deberá considerar como se especifica en el Artículo 6.9. Los pilotes que atraviesan agua o aire se deberán suponer empotrados a una cierta profundidad debajo de la superficie

C6.15.3.3

En lugar de utilizar un análisis P- Δ el Ingeniero podrá optar por utilizar un método aproximado que considere aceptable.

del terreno. La estabilidad se deberá determinar de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.9 para elementos comprimidos, usando una longitud equivalente del pilote igual a la longitud sin apoyo lateral más una profundidad embebida hasta el empotramiento. La profundidad hasta el empotramiento se deberá determinar de acuerdo con el Artículo 10.7.4.2 en el caso de los pilotes inclinados o mediante un análisis $P-\Delta$ en el caso de los pilotes verticales

6.15.4 Máximas tensiones de hincado admisibles

Las máximas tensiones de hincado admisibles para los pilotes hincados de acero se deberá tomar como se especifica en el Artículo 10.7.1.16.

APÉNDICE A - RESISTENCIA A LA FLEXIÓN - SECCIONES COMPUESTAS EN FLEXIÓN NEGATIVA Y SECCIONES NO COMPUESTAS CON ALMAS COMPACTAS O NO COMPACTAS

A6.1 DISPOSICIONES GENERALES

Estos requisitos se deberán aplicar solamente a los elementos que satisfagan las siguientes condiciones:

- las resistencias mínimas especificadas de las alas y el alma son menores o iguales que 485 MPa,
- el alma satisface el límite de esbeltez no compacto:

$$\frac{2D_c}{t_w} < 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{ye}}} \quad (\text{A6.1-1})$$

y:

- las alas satisfacen la siguiente relación:

$$\frac{I_{yc}}{I_{yt}} \geq 0.3 \quad (\text{A6.1-2})$$

donde:

D_c = profundidad del alma en compresión en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

I_{yc} = momento de inercia del ala comprimida de la sección de acero respecto del eje vertical en el plano del alma (mm⁴)

I_{yt} = momento de inercia del ala traccionada de la sección de acero respecto del eje vertical en el plano del alma (mm⁴)

Caso contrario, la sección se deberá dimensionar de acuerdo con los requisitos especificados en el Artículo 6.10.8.

Las secciones diseñadas de acuerdo con estos requisitos deberán ser calificadas ya sea como secciones de alma compacta o como secciones de alma no compacta tal como se especifica en el Artículo A6.2.

CA6.1

Los requisitos opcionales del Apéndice A toman en cuenta la capacidad de las secciones doble Te de alma compacta y no compacta para desarrollar resistencias a la flexión significativamente mayores que M_y cuando la esbeltez del alma, $2D_c/t_w$ está muy por debajo del límite no compacto dado por la Ecuación 1 (que es una formulación diferente de la Ecuación 6.10.6.2.3-1) y cuando se satisfacen requisitos suficientes respecto de las resistencias a la fluencia mínimas especificadas de las alas, la esbeltez del ala de compresión, $b_{fc}/2t_{fc}$, y la separación de las riostras laterales. Estos requisitos también toman en cuenta la contribución beneficiosa de la constante de torsión de Saint-Venant, J . Esto puede resultar de utilidad, particularmente bajo condiciones constructivas, para aquellas secciones con almas compactas o no compactas que tienen grandes longitudes no arriostradas en las cuales se puede requerir resistencia al pandeo lateral torsional adicional. Además, en el caso de los perfiles con $D/b_f < 1.7$, los cuales se pueden utilizar como vigas-columnas en los pórticos de acero, J afecta fuertemente tanto la resistencia al pandeo inelástico como la resistencia al pandeo elástico.

Los potenciales beneficios de los requisitos del Apéndice A tienden a ser pequeños para las secciones doble Te con almas que se aproximan al límite de esbeltez para almas no compactas de la Ecuación 1. Para esos casos se recomienda utilizar los requisitos más sencillos del Artículo 6.10.8. Los potenciales beneficios económicos que se obtienen usando el Apéndice A aumentan a medida que disminuye la esbeltez del alma. El Ingeniero debería considerar seriamente utilizar el Apéndice A para las secciones en las cuales el alma es compacta o prácticamente compacta. En particular, se recomienda utilizar los requisitos del Apéndice A para las secciones con almas compactas, tal como se definen en el Artículo A6.2.1.

Los requisitos del Apéndice A son totalmente consistentes con los procedimientos principales del Artículo 6.10.8 en términos de concepto e implementación, y constituyen una extensión directa de los mismos. El cálculo de potenciales resistencias a la flexión mayores que M_y se realiza usando los parámetros de plastificación del alma R_{pc} y R_{pf} del Artículo A6.2, correspondientes a compresión y tracción por flexión, respectivamente. Estos parámetros se aplican de manera muy similar a los parámetros para pandeo flexional del alma y vigas híbridas R_b y R_h que se utilizan en los requisitos de la parte principal de la especificación.

Es más probable que los elementos de sección doble Te cuyas alas tienen una resistencia a la fluencia mínima

especificada mayor que 485 MPa estén controlados por consideraciones de diseño diferentes a las Combinaciones de Cargas para Estado Límite de Resistencia que se utilizan en la construcción de puentes comunes. En los casos en que la Ecuación 1 se satisface con $F_{yc} > 485$ MPa, en general las implicancias de diseñar tales elementos usando una resistencia nominal a la flexión mayor que M_y no han sido suficientemente estudiadas como para ameritar el uso del Apéndice A.

La Ecuación 2 se especifica para evitar las secciones doble Te no compuestas extremadamente monosimétricas, en las cuales estudios analíticos realizados indican que hay una pérdida significativa de la influencia de la rigidez a la torsión de Saint-Venant GJ sobre la resistencia al pandeo lateral torsional debido a la distorsión de la sección transversal. Si las alas son de igual espesor, este límite es equivalente a $b_{fc} > 0.67b_{ft}$.

A6.1.1 Secciones con alas de compresión con arriostramiento discreto

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$M_u + \frac{1}{3} f_\ell S_{xc} \leq \phi_f M_{nc} \quad (\text{A6.1.1-1})$$

donde:

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

f_ℓ = tensión de flexión lateral del ala determinada como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (MPa)

M_{nc} = resistencia nominal a la flexión en base al ala de compresión determinada como se especifica en el Artículo A6.3 (N-mm)

M_u = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.6 (N-mm)

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm³)

CA6.1.1

La Ecuación 1 considera el efecto de la combinación de flexión respecto del eje mayor y la flexión lateral del ala de compresión utilizando el enfoque de una ecuación de interacción. Esta ecuación expresa la resistencia a la flexión en términos del momento flector respecto del eje mayor de la flexión, M_u , y la tensión de flexión lateral del ala, f_ℓ calculada mediante un análisis elástico, aplicable dentro de los límites para f_ℓ especificados en el Artículo 6.10.1.6.

Para las secciones correctamente arriostradas que tienen un alma y el ala de compresión compactas, las Ecuaciones 1 y A6.1.2-1 generalmente constituyen una representación conservadora de la resistencia que se obtiene mediante procedimientos que toman en cuenta el efecto de los momentos que el viento provoca en las alas indicados en el Artículo 6.10.3.5.1 de AASHTO (1998). En el límite teórico en que el área del alma se vuelve despreciable con respecto al área del ala, estas ecuaciones son una buena aproximación de los resultados de un análisis de sección elasto-plástico en el cual se resta una fracción del ancho de las puntas de las alas para tomar en cuenta la flexión lateral del ala. El grado de conservadurismo de estas ecuaciones con respecto a la solución teórica aumenta a medida que aumenta el valor de $D_{cp} t_w / b_{fc} t_{fc}$, f_ℓ y/o $|D_{cp} - D_c|$. El grado de conservadurismo en el límite para f_ℓ especificado por la Ecuación 6.10.1.6-1 varía entre alrededor de tres y diez por ciento para las secciones doble Te que en la práctica se utilizan para resistir flexión.

Multiplicar f_ℓ por S_{xc} en la Ecuación 1 y por S_{xt} en la Ecuación A6.1.2-1 surge de la manera en que se desarrollaron estas ecuaciones, y se explica detalladamente en White (2004). Estas ecuaciones se pueden expresar en un formato basado en tensiones, dividiendo ambos lados de

las mismas por el módulo resistente elástico correspondiente, en cuyo caso la Ecuación 1 se reduce efectivamente a las Ecuaciones 6.10.3.2.1-2 y 6.10.8.1.1-1 en el límite en que el alma se aproxima a su límite de esbeltez no compacta. En consecuencia, en este límite la Ecuación A6.1.2-1 se reduce efectivamente a las Ecuaciones 6.10.7.2.1-2 y 6.10.8.1.2-1.

Los módulos resistentes elásticos, S_{xc} en este Artículo y S_{xt} en el Artículo A6.1.2, se definen como M_{yc}/F_{yc} y M_{yt}/F_{ty} respectivamente, donde M_{yc} y M_{yt} se calculan como se especifica en el Artículo D6.2. Esta definición es necesaria de manera que, para una sección compuesta con un alma dimensionada precisamente en el límite no compacto dado por la Ecuación A6.1-1, la resistencia a la flexión anticipada por el Apéndice A sea aproximadamente igual a la anticipada por el Artículo 6.10.8. Las diferencias entre estos dos valores anticipados se deben a las hipótesis simplificadoras de considerar $J = 0$ en lugar de $J \neq 0$ al determinar la resistencia al pandeo lateral torsional y la longitud no arriostrada límite L_r , al uso de $k_c = 0.35$ en lugar del uso de k_c de la Ecuación A6.3.2-6 para determinar la esbeltez límite para un ala no compacta, y al uso de una definición de F_{yr} levemente diferente. La máxima resistencia potencial a la flexión, indicada como F_{max} en la Figura C6.10.8.2.1-1, se define en términos de las tensiones en el ala como $R_h F_{yf}$ para una sección con un alma dimensionada precisamente en el límite para un alma no compacta y diseñada de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.8, siendo R_h es el factor de hibridez definido en el Artículo 6.10.1.10.1. Tal como se discutió en el Artículo 6.10.1.1.1a, para las secciones compuestas la tensión del ala calculada elásticamente a comparar con este límite se deberá tomar como la sumatoria de las tensiones provocadas por las cargas aplicadas separadamente a la sección de acero, la sección compuesta a corto plazo y la sección compuesta a largo plazo. Los requisitos resultantes del Artículo 6.10.8 constituyen un pronóstico razonable de la resistencia para secciones de alma esbelta en las cuales el alma se dimensiona precisamente en el límite no compacto. Calculando S_{xc} y S_{xt} de la manera indicada se obtienen módulos resistentes elásticos que, al ser multiplicados por las correspondientes resistencias a la flexión determinadas a partir del Artículo 6.10.8 para el caso de una sección compuesta de alma esbelta dimensionada precisamente en el límite de alma no compacta, producen aproximadamente las mismas resistencias a la flexión que las que se pronostican usando el Apéndice A.

Para las secciones compuestas en las cuales los valores de esbeltez del alma se aproximan al límite correspondiente a alma compacta indicado por la Ecuación A6.2.1-2, los efectos de la aplicación de las cargas a la sección de acero, la sección a corto plazo y la sección a largo plazo son anulados por la fluencia que ocurre en la sección debido al

desarrollo de la resistencia a la flexión especificada. Por lo tanto, para las secciones de alma compacta, estas Especificaciones definen la máxima resistencia potencial a la flexión, indicada como M_{max} en la Figura C6.10.8.2.1-1, como el momento plástico M_p , que es independiente de los efectos de las diferentes cargas.

A6.1.2 Secciones con alas de tracción con arriostramiento discreto

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$M_u + \frac{1}{3} f_\ell S_{xt} \leq \phi_f M_{nt} \quad (\text{A6.1.2-1})$$

donde:

M_{nt} = resistencia nominal a la flexión en base a la fluencia por tracción determinada como se especifica en el Artículo A6.4 (N-mm)

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

S_{xt} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} , (mm³)

A6.1.3 Secciones con alas de compresión con apoyo lateral continuo

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer el siguiente requisito:

$$M_u \leq \phi_f R_{pc} M_{yc} \quad (\text{A6.1.3-1})$$

donde:

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_{pc} = factor de plastificación del alma para el ala de compresión determinado como se especifica en los Artículos A6.2.1 o A6.2.2, según corresponda

A6.1.4 Secciones con alas de tracción con apoyo lateral continuo

En el Estado Límite de Resistencia se deberá satisfacer

CA6.1.2

La Ecuación es similar a la Ecuación A6.1.1-1 para alas de compresión con arriostramiento discreto, pero se aplica al caso de las alas con arriostramiento discreto en tracción por flexión debido al momento flector respecto del eje mayor.

Cuando f_ℓ es igual a cero y M_{yc} es menor o igual que M_{yt} , la resistencia a la flexión basada en el ala de tracción no resulta determinante y por lo tanto no es necesario verificar la Ecuación 1. En este caso tampoco es necesario calcular el factor de plastificación del alma para fluencia del ala de tracción, R_{pt} del Artículo A6.2.

CA6.1.3

Tal como se discute en el Artículo C6.10.1.6, en las alas con apoyo lateral continuo no es necesario considerar la flexión lateral de las alas.

el siguiente requisito:

$$M_u \leq \phi_f R_{pt} M_{yt} \quad (\text{A6.1.4-1})$$

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_{pt} = factor de plastificación del alma para el ala de tracción determinado como se especifica en los Artículos A6.2.1 o A6.2.2, según corresponda

A6.2 FACTORES DE PLASTIFICACIÓN DEL ALMA

A6.2.1 Secciones de alma compacta

Las secciones que satisfacen los siguientes requisitos deberán ser clasificadas como secciones de alma compacta:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq \lambda_{pw(D_{cp})} \quad (\text{A6.2.1-1})$$

donde:

$\lambda_{pw(D_{cp})}$ = relación de esbeltez límite para un alma compacta correspondiente a $2D_{cp}/t_w$

$$= \frac{\sqrt{\frac{E}{F_{yc}}}}{\left(0.54 \frac{M_p}{R_h M_y} - 0.09\right)^2} \leq \lambda_{rw} \quad (\text{A6.2.1-2})$$

λ_{rw} = relación de esbeltez límite para un alma no compacta

$$= 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{A6.2.1-3})$$

D_{cp} = profundidad del alma comprimida cuando se produce el momento plástico determinada como se especifica en el Artículo D6.3.2 (mm)

M_y = momento de fluencia tomado como el menor valor entre M_{yc} y M_y , determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

Los factores de plastificación del alma se deberán tomar

CA6.2.1

La Ecuación 1 asegura que la sección será capaz de desarrollar la totalidad de la capacidad de momento plástico M_p siempre que se satisfagan los demás requisitos referentes a la esbeltez del ala y arriostramiento lateral y torsional. Este límite es significativamente menor que el límite para almas no compactas indicado en la Tabla C6.10.1.10.2-2. Los perfiles doble Te laminados generalmente lo satisfacen, no así las secciones armadas (que son más eficientes).

La Ecuación 2 es un límite de compacidad del alma modificado con respecto a ediciones anteriores de las Especificaciones que toma en cuenta las mayores demandas a las cuales está sometida el alma en las secciones doble Te compuestas monosimétricas y en las secciones doble Te compuestas en flexión negativa con factores de forma, M_p/M_y más elevados (White y Barth 1998). Este nuevo límite de compacidad del alma elimina la necesidad de proveer una ecuación de interacción entre los requisitos de compacidad del alma y del ala (AASHTO 1996, 1998). Cuando $M_p/M_y = 1.12$ (valor representativo del factor de forma de las secciones doble Te no compuestas doblemente simétricas), la Ecuación 2 se reduce al límite de compacidad del alma dado por la Ecuación 6.10.4.1.2-1 de AASHTO (1998). Debido a que no se han realizado investigaciones para cuantificar de manera precisa los requisitos de compacidad del alma para este tipo de secciones, y como además la mayoría de las secciones compuestas en flexión positiva satisfacen este requisito fácilmente, en la Ecuación 6.10.6.2.2-1 se ha mantenido el límite de compacidad del alma anterior para las secciones compuestas en flexión positiva.

Las restricciones referentes a la compacidad del alma impuestas por la Ecuación 2 son aproximadamente iguales a los requisitos implícitamente requeridos para desarrollar la resistencia al momento plástico, M_p , mediante la fórmula para determinar Q de AASHTO (1998). En la Figura C1 se grafican ambos requisitos en función de M_p/M_y para $F_{yc} =$

como:

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (\text{A6.2.1-4})$$

$$R_{pt} = \frac{M_p}{M_{yt}} \quad (\text{A6.2.1-5})$$

donde:

M_p = momento plástico determinado como se especifica en el Artículo D6.1 (N-mm)

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_{pc} = factor de plastificación del alma para el ala de compresión

R_{pt} = factor de plastificación del alma para fluencia del ala de tracción

A6.2.2 Secciones de alma no compacta

Las secciones que no satisfacen el requisito de la Ecuación A6.2.1-1, pero cuya alma tiene una esbeltez que satisface el siguiente requisito:

$$\lambda_w < \lambda_{rw} \quad (\text{A6.2.2-1})$$

deberán ser calificadas como secciones de alma no compacta, donde:

λ_w = relación de esbeltez para el alma basada en el momento elástico

$$= \frac{2D_t}{t_w} \quad (\text{A6.2.2-2})$$

345 MPa.

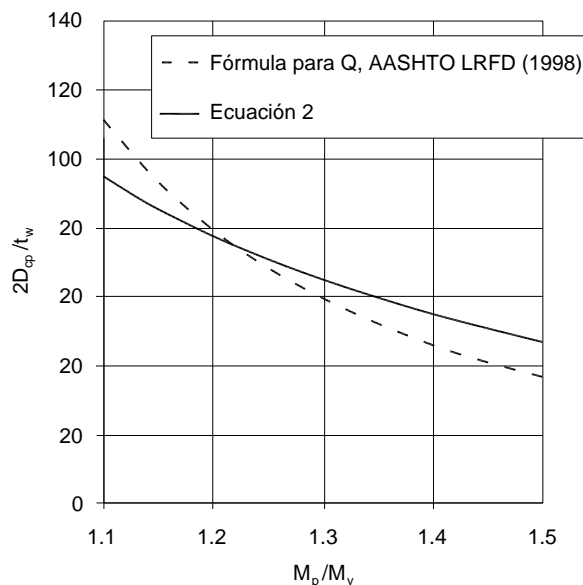


Figura CA6.2.1-1 Límites de la compacidad del alma en función de M_p/M_y según la fórmula para determinar Q de AASHTO (1998) y la Ecuación 2 para $F_{yc} = 345$ MPa

Para una sección de alma compacta, la máxima resistencia potencial al momento, representada por M_{max} en la Figura C6.10.8.2.1-1, es simplemente igual a M_p . Las Ecuaciones 4 y 5 capturan este atributo y eliminan la necesidad de repetir las ecuaciones de resistencia a la flexión subsiguientes de manera prácticamente idéntica para las secciones de alma compacta y no compacta. Para las secciones de alma compacta, los factores de plastificación del alma son equivalentes a los factores de forma.

CA6.2.2

Las Ecuaciones 4 y 5 toman en cuenta la influencia de la esbeltez del alma sobre la máxima resistencia potencial a la flexión, M_{max} en la Figura C6.10.8.2.1-1, para secciones de alma no compacta. A medida que $2D_c/t_w$ se aproxima al límite de alma no compacta λ_{rw} , R_{pc} y R_{pt} se aproximan a valores iguales a 1.0 y la máxima resistencia potencial a la flexión expresada en las ecuaciones en estado límite subsiguientes se limita a la capacidad de momento de fluencia M_y . A medida que $2D_c/t_w$ se aproxima al límite de alma compacta $\lambda_{pw(Dcp)}$ las Ecuaciones 4 y 5 definen una transición suave en la máxima resistencia potencial a la flexión, expresada por las ecuaciones en estado límite subsiguientes, entre M_y y la resistencia al momento plástico M_p . Para una sección de alma compacta, los factores de plastificación del alma R_{pc} y R_{pt} son simplemente los factores de forma correspondientes a las alas de compresión

λ_{rw} = relación de esbeltez límite para un alma no compacta

$$= 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{A6.2.2-3})$$

D_c = profundidad del alma en compresión en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

Los factores de plastificación del alma se deberán tomar como:

$$R_{pc} = \left[1 - \left(1 - \frac{R_h M_{yc}}{M_p} \right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw(D_c)}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw(D_c)}} \right) \right] \frac{M_p}{M_{yc}} \leq \frac{M_p}{M_{yc}} \quad (\text{A6.2.2-4})$$

$$R_{pt} = \left[1 - \left(1 - \frac{R_h M_{yt}}{M_p} \right) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_{pw(D_c)}}{\lambda_{rw} - \lambda_{pw(D_c)}} \right) \right] \frac{M_p}{M_{yt}} \leq \frac{M_p}{M_{yt}} \quad (\text{A6.2.2-5})$$

donde:

$\lambda_{pw(D_c)}$ = relación de esbeltez límite para un alma compacta correspondiente a $2D_c/t_w$

$$= \lambda_{pw(D_{cp})} \left(\frac{D_c}{D_{cp}} \right) \quad (\text{A6.2.2-6})$$

y tracción, M_p/M_{yc} y M_p/M_{yt} . Para estos tipos de secciones, antes que simplemente expresar la máxima resistencia como M_p , las ecuaciones subsiguientes para resistencia a la flexión se expresan usando R_{pc} y R_{pt} a fin de evitar la repetición de ecuaciones de resistencia que en todo lo demás son idénticas.

En las Ecuaciones 4 y 5, se definen límites máximos explícitos para M_p/M_{yc} y M_p/M_{yt} para R_{pc} y R_{pt} , respectivamente. En consecuencia, la mayor de las resistencias de base, $R_{pc}M_{yc}$ o $R_{pt}M_{yt}$, se limita a M_p para una sección altamente monosimétrica en la cual M_{yc} o M_{yt} pueden ser mayores que M_p . Los límites para I_{yc}/I_{yt} indicados en el Artículo 6.10.2.2 tenderán a evitar el uso de secciones extremadamente monosimétricas que tengan valores de M_{yc} o M_{yt} mayores que M_p . Los límites superiores para R_{pc} y R_{pt} se proveen para que en estos casos extremos las Ecuaciones 4 y 5 sean correctas desde un punto de vista teórico, aunque es poco probable que ocurran los tipos de secciones monosimétricas en las cuales estos límites resultan determinantes.

La Ecuación 6 convierte el límite de compacidad del alma dado por la Ecuación A6.2.1-2, el cual se define en términos de D_{cp} , en un valor que se puede usar consistentemente en términos de D_c en las Ecuaciones 4 y 5. En aquellos casos en los cuales $D_c/D > 0.5$ típicamente D_{cp}/D es menor que D_c/D ; por lo tanto, $\lambda_{pw(D_c)}$ es menor que $\lambda_{pw(D_{cp})}$. Sin embargo, cuando $D_c/D < 0.5$ típicamente D_{cp}/D es mayor que D_c/D y $\lambda_{pw(D_c)}$ es mayor que $\lambda_{pw(D_{cp})}$. En casos extremos en los cuales D_c/D es significativamente menor que 0.5 la esbeltez del alma asociada con la sección transversal elástica, $2D_c/t_w$, puede ser mayor que λ_{rw} , mientras que la asociada con la sección transversal plástica, $2D_{cp}/t_w$, puede ser menor que $\lambda_{pw(D_{cp})}$ sin el límite superior de λ_{rw} que se impone para este valor. En otras palabras, el alma elástica se clasifica como esbelta, mientras que el alma plástica se clasifica como compacta. En estos casos el límite de alma compacta se define como $\lambda_{pw(D_{cp})} = \lambda_{rw}$. Esta es una aproximación conservadora cuyo objeto es evitar la ocurrencia de pandeo flexional en el alma antes de llegar a la resistencia plástica de la sección. Esto es consistente con el tratamiento que AASHTO (1998) y AISC (1999) dan a estas secciones, y en las Ecuaciones A6.2.1-4 y A6.2.1-5 es abordado en términos de los parámetros R_{pc} y R_{pt} .

La relación D_c/D es generalmente mayor que 0.5 para secciones no compuestas con un ala menor en compresión, tales como las típicas vigas de sección doble Te en flexión positiva antes que se vuelvan compuestas.

Por lo tanto, para el diseño de puentes generalmente se aplicarán las Ecuaciones 4 y 5 y no las Ecuaciones A6.2.1-4 y A6.2.1-5.

A6.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BASADA EN EL ALA DE COMPRESIÓN

A6.3.1 Disposiciones generales

La resistencia nominal a la flexión basada en el ala de compresión se deberá tomar como el menor valor entre la resistencia al pandeo local determinada como se especifica en el Artículo A6.3.2 y la resistencia al pandeo lateral torsional determinada como se especifica en el Artículo A6.3.3.

CA6.3.1

Todas las ecuaciones para resistencia a la flexión del ala de compresión de las secciones doble Te de estas Especificaciones se basan consistentemente en la identificación de los dos puntos de anclaje ilustrados en la Figura C6.10.8.2.1-1. El punto de anclaje 1 está ubicado en la longitud $L_b = L_p$ para pandeo lateral torsional¹ o la esbeltez del ala $b_{fc}/2t_{fc} = \lambda_{pf}$ para pandeo local del ala² correspondiente al desarrollo de la máxima resistencia potencial a la flexión, designada como F_{max} o M_{max} en la figura. El punto de anclaje 2 está ubicado en la menor longitud entre $L_b = L_r$ o la esbeltez del ala λ_{rf} para la cual las resistencias al pandeo lateral torsional o al pandeo local del ala son gobernadas por el pandeo elástico. En la totalidad del Artículo A6.3 esta resistencia se toma como el menor valor entre $0.7F_{yc}$, F_{yw} o $R_h F_{yt} S_{xt} / S_{xc}$, pero nunca menor que $0.5F_{yc}$. Las dos primeras de estas resistencias son iguales que en el Artículo 6.10.8. La tercera expresión de resistencia, $R_h F_{yt} S_{xt} / S_{xc}$, que es simplemente la tensión elástica del ala de compresión cuando el momento en la sección transversal $R_h F_{yt} S_{xt} = R_h M_{yt}$ aparece solamente en el Artículo A6.3 y refleja los efectos de una fluencia temprana significativa del ala de tracción en las secciones en las cuales la profundidad del alma en compresión es pequeña. En las secciones que presentan esta característica, la fluencia temprana del ala de tracción invalida la ecuación para pandeo lateral torsional elástico en la cual se basa el límite para arriostramiento no compacto L_r , y también pone en duda la correspondiente ecuación para pandeo local elástico del ala debido a una potencial redistribución inelástica significativa de las tensiones hacia el ala de compresión. El límite $R_h F_{yt} S_{xt} / S_{xc}$ raramente resulta determinante para las vigas doble Te de los puentes, pero puede resultar determinante en algunos casos de secciones sobre pilas solicitadas a momento negativo en tramos continuos compuestos antes que la sección se vuelva compuesta, cuando el ala superior es significativamente menor que el ala inferior. En estos requisitos no se especifican explícitamente las ecuaciones para la resistencia al pandeo local elástico del ala debido a que los límites del Artículo 6.10.2.2 significan que no habrá pandeo local elástico para resistencias mínimas a la fluencia especificadas menores o iguales que $F_{yc} = 485$ MPa.

¹ Pandeo lateral torsional, también conocido como LTB por sus siglas en inglés (*Lateral Torsional Buckling*)

² Pandeo local del ala, también conocido como LFB por sus siglas en inglés (*Local Flange Buckling*)

A6.3.2 Resistencia al pandeo local

La resistencia a la flexión basada en el pandeo local del ala de compresión se deberá tomar como:

- Si $\lambda_f \leq \lambda_{pf}$, entonces:

$$M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (\text{A6.3.2-1})$$

- Caso contrario:

$$M_{nc} = \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}} \right) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] R_{pc} M_{yc} \quad (\text{A6.3.2-2})$$

donde:

λ_f = relación de esbeltez para el ala de compresión

$$= \frac{b_{fc}}{2t_{fc}} \quad (\text{A6.3.2-3})$$

λ_{pf} = relación de esbeltez límite para un ala compacta

$$= 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{A6.3.2-4})$$

λ_{rf} = relación de esbeltez límite para un ala no compacta

$$= 0.95 \sqrt{\frac{E k_c}{F_{yr}}} \quad (\text{A6.3.2-5})$$

k_c = coeficiente de pandeo local del ala

- Para las secciones compuestas:

$$= \frac{4}{\sqrt{\frac{D}{t_w}}} \quad (\text{A6.3.2-6})$$

$$0.35 \leq k_c \leq 0.76$$

- Para los perfiles laminados:

$$= 0.76$$

donde:

F_{yr} = tensión en el ala de compresión cuando se inicia la fluencia nominal en la sección transversal, considerando los efectos de las tensiones residuales pero sin considerar la flexión lateral del ala de

CA6.3.2

La Ecuación 4 define el límite de esbeltez para un ala compacta, mientras que la Ecuación 5 da la relación de esbeltez para un ala no compacta. La resistencia nominal a la flexión de una sección con un ala compacta es independiente de la esbeltez del ala, mientras que la resistencia a la flexión de una sección con un ala no compacta se expresa como una función lineal de la esbeltez del ala, tal como se ilustra en la Figura C6.10.8.2.1-1. El límite de esbeltez para las secciones que tienen un ala compacta es el mismo que especifican AISC (1999), AASHTO (1996, 1998) y el Artículo 6.10.8.2.2. En la Tabla C6.10.8.2.2-1 se especifica este límite de esbeltez para diferentes grados de acero. Excepto los W530 × 71, W360 × 147, W360 × 134, W310 × 97, W250 × 17.9, W200 × 46.1, W200 × 15, W150 × 22.5, W150 × 13.5 y W150 × 12.7, para $F_y < 345$ MPa todos los perfiles ASTM W tienen alas compactas.

La Ecuación 6 para determinar el coeficiente de pandeo local del ala viene de la implementación de las investigaciones de Johnson (1985) en AISC (1999). El valor de $k_c = 0.35$ es un límite inferior calculado hacia atrás igualando las resistencias de estos requisitos, o en caso que este artículo no sea aplicable, las del Artículo 6.10.8.2.2, con las resistencias medidas en los ensayos realizados por Johnson y otros investigadores como por ejemplo Basler et al. (1960). Se consideraron ensayos con valores de $D/t_w = 72$ a 245. Para uno de los elementos ensayados por Basler et al. (1960) para el cual $D/t_w = 185$ y cuya ala de compresión había sido dañada en un ensayo previo y posteriormente enderezada y recortada para que tuviera un ancho menor antes de ser sometida a un nuevo ensayo se calculó un k_c igual a 0.28. Al seleccionar el límite inferior no se consideró el resultado de este ensayo. Para otros ensayos realizados por Johnson (1985) con valores de D/t_w más elevados se calcularon valores de k_c superiores a 0.4. En la condición ideal de alma y ala simplemente apoyadas se obtiene un valor de $k_c = 0.43$ (Timoshenko y Gere 1961). Los valores de k_c más pequeños se deben al hecho de que en las almas más esbeltas el pandeo local del alma tiende a desestabilizar el ala de compresión. El valor de $k_c = 0.76$ para perfiles laminados fue tomado de AISC (1999).

compresión, tomada como el menor valor entre $0.7F_{yc}$, $R_h F_{yt} S_{xt}/S_{xc}$ y F_{yw} pero nunca menor que $0.5F_{yc}$

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

R_{pc} = factor de plastificación del alma para el ala de compresión determinado como se especifica en los Artículos A6.2.1 o A6.2.2, según corresponda

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm^3)

S_{xt} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} (mm^3)

A6.3.3 Resistencia al pandeo lateral torsional

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento es prismático, la resistencia a la flexión basada en el pandeo lateral torsional se deberá tomar como:

- Si $L_b \leq L_p$, entonces:

$$M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (\text{A6.3.3-1})$$

- Si $L_p < L_b \leq L_r$, entonces:

$$M_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}} \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] R_{pc} M_{yc} \leq R_{pc} M_{yc} \quad (\text{A6.3.3-2})$$

- Si $L_b > L_r$, entonces:

$$M_{nc} = F_{cr} S_{xc} \leq R_{pc} M_{yc} \quad (\text{A6.3.3-3})$$

donde:

L_b = longitud no arriostrada (mm)

L_p = longitud no arriostrada límite para alcanzar la resistencia nominal a flexión $R_{pc} M_{yc}$ bajo flexión

CA6.3.3

La Ecuación 4 define el límite para longitud no arriostrada compacta para un elemento solicitado a flexión uniforme respecto del eje mayor, mientras que la Ecuación 5 da el límite correspondiente para longitud no arriostrada no compacta. La resistencia nominal a la flexión de un elemento arriostrado en o por debajo del límite compacto es independiente de la longitud no arriostrada, mientras que la resistencia a la flexión de un elemento arriostrado en o por debajo del límite no compacto se expresa como una función lineal de la longitud no arriostrada como se ilustra en la Figura C6.10.8.2.1-1. El límite de arriostramiento compacto de la Ecuación 4 es similar al requisito de arriostramiento para uso de las ecuaciones generales de resistencia a la flexión para secciones compactas y/o las ecuaciones para Q de AASHTO (1998). El límite dado por la Ecuación 4 generalmente es algo más restrictivo que el límite dado por la correspondiente ecuación de L_p en AASHTO (1998) y AISC (1999). El límite dado por la Ecuación 4 se basa en un análisis de regresión lineal dentro de la región correspondiente a la ecuación de pandeo lateral torsional inelástico, ilustrada cualitativamente en la Figura C6.10.8.2.1-1, para un amplio rango de datos obtenidos de ensayos con flexión respecto del eje mayor y en los cuales la longitud física efectiva para pandeo lateral torsional era efectivamente 1.0. Observar que la solución más económica

uniforme (mm)

$$= 1.0 r_t \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{A6.3.3-4})$$

L_r = longitud no arriostrada límite para llegar al inicio de la fluencia nominal en cualquiera de las alas bajo flexión uniforme considerando los efectos de las tensiones residuales en el ala de compresión (mm)

$$= 1.95 r_t \frac{E}{F_{yr}} \sqrt{\frac{J}{S_{xc} h}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left(\frac{F_{yr}}{E} \frac{S_{xc} h}{J} \right)^2}} \quad (\text{A6.3.3-5})$$

C_b = modificador del gradiente de momentos. En ausencia de un análisis racional alternativo, C_b se podrá calcular de la siguiente manera:

- Para voladizos no arriostrados y para elementos en los cuales $M_{mid}/M_2 > 1$ ó $M_2 = 0$

$$C_b = 1.0 \quad (\text{A6.3.3-6})$$

- Para todos los demás casos,

$$C_b = 1.75 - 1.05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2.3 \quad (\text{A6.3.3-7})$$

F_{cr} = tensión de pandeo lateral torsional elástico (MPa)

$$= \frac{C_b \pi^2 E}{(L_b / r_t)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J}{S_{xc} h} (L_b / r_t)^2} \quad (\text{A6.3.3-8})$$

J = constante de torsión de Saint-Venant (mm⁴)

$$= \frac{D t_w^3}{3} + \frac{b_{fc} t_{fc}^3}{3} \left(1 - 0.63 \frac{t_{fc}}{b_{fc}} \right) + \frac{b_{ft} t_{ft}^3}{3} \left(1 - 0.63 \frac{t_{ft}}{b_{ft}} \right) \quad (\text{A6.3.3-9})$$

r_t = radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional (mm)

$$= \frac{b_{fc}}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{D_c t_w}{b_{fc} t_{fc}} \right)}} \quad (\text{A6.3.3-10})$$

no siempre se logra limitando la longitud no arriostrada al valor de L_p para alcanzar la máxima resistencia a la flexión, M_{max} , particularmente si el modificador del gradiente de momentos, C_b , se toma igual a 1.0.

La Ecuación 8 da la solución exacta basada en la teoría de vigas para la resistencia al pandeo lateral torsional elástico de una sección doble Te doblemente simétrica (Timoshenko y Gere 1961) para el caso de flexión uniforme respecto del eje mayor cuando C_b es igual a 1.0 y cuando r_t se define como se especifica en la Ecuación C6.10.8.2.3-1. La Ecuación 10 es una simplificación de esta ecuación para r_t que se obtiene suponiendo $D = h = d$. Para las secciones de alas gruesas, la Ecuación 10 da un valor de r_t que puede ser hasta tres o cuatro por ciento conservador con respecto a la ecuación exacta. Está permitido usar la Ecuación C6.10.8.2.3-1 para los cálculos realizados con ayuda de software o si el Ingeniero requiere un cálculo más preciso de la resistencia al pandeo lateral torsional elástico. El formato de la Ecuación 8 y el correspondiente L_r límite de la Ecuación 5 son particularmente convenientes para su uso en el diseño, ya que los términos L_b , r_t , J , S_{xc} y h son familiares y fáciles de calcular o bien se pueden obtener rápidamente de las tablas de diseño. Además, si igualamos J a cero, la Ecuación 8 se reduce a la resistencia al pandeo lateral torsional elástico usada en el Artículo 6.10.8.2.3.

La Ecuación 8 también constituye una aproximación precisa de la solución exacta para pandeo lateral torsional elástico de elementos de sección doble Te monosimétricos basada en la teoría de vigas (White 2004). Para el caso de $J > 0$ y flexión uniforme, y considerando secciones doble Te en las cuales $D/b_f > 2$, $b_{fc}/2t_{fc} > 5$ y $L_b = L_r$ el error de la Ecuación 8 respecto de la solución exacta en base a la teoría de vigas varía entre 12 por ciento del lado conservador hasta un 2 por ciento del lado no conservador (White 2004). Una ecuación comparable de AASHTO (1998) basada en I_{yc} da errores máximos del lado conservador de aproximadamente 15 por ciento para el mismo conjunto de parámetros estudiados. Para el raro caso de una sección no compuesta de alma compacta o no compacta ya sea con $D/b_f < 2$ o $b_{fc}/2t_{fc} < 5$, e $I_{yc}/I_{yt} > 1.5$, si se desea obtener una solución más exacta se debería considerar el uso de las ecuaciones basadas en la teoría de vigas (White 2004). Para las secciones doble Te altamente monosimétricas con un ala de compresión más pequeña o para las secciones doble Te compuestas en flexión negativa, tanto la Ecuación 8 como la anterior ecuación de AASHTO (1998) basada en I_{yc} son algo conservadoras en comparación con las soluciones rigurosas basadas en la teoría de vigas. Esto se debe a que estas ecuaciones no toman en cuenta la restricción contra el pandeo lateral del ala de compresión que proporcionan el ala de tracción de mayor tamaño o el tablero. Sin embargo, en muchas situaciones prácticas la flexibilidad por distorsión del alma reduce significativamente este efecto

donde:

F_{yr} = tensión en el ala de compresión cuando se inicia la fluencia nominal en la sección transversal, considerando los efectos de las tensiones residuales pero sin considerar la flexión lateral del ala de compresión, tomado como el menor valor entre $0.7F_x$, $R_h F_{yt} S_{xt}/S_{xc}$ y F_{yw} , pero nunca menor que $0.5F_{yc}$

D_c = profundidad del alma en compresión en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

h = profundidad entre los ejes de las alas (mm)

M_{mid} = momento flector respecto del eje mayor a la mitad de la longitud no arriostrada, calculado a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto en el ala considerada, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión (N-mm). M_{mid} deberá corresponder a las cargas mayoradas; cuando M_{mid} provoca compresión en el ala considerada se deberá considerar positivo, cuando provoca tracción se deberá considerar negativo.

M_0 = momento flector en el punto de arriostramiento opuesto al correspondiente a M_2 , calculado a partir del valor de la envolvente de momentos que produce la mayor compresión en este punto en el ala considerada, o la menor tracción si este punto nunca está solicitado a compresión (N-mm). M_0 deberá corresponder a las cargas mayoradas; cuando M_0 provoca compresión en el ala considerada se deberá considerar positivo, cuando provoca tracción se deberá considerar negativo.

$$M_1 = 2M_{mid} - M_2 \geq M_0 \quad (\text{A6.3.3-11})$$

M_2 = excepto como se especifica a continuación, mayor momento flector respecto del eje principal en cualquiera de los extremos de la longitud no arriostrada que produce compresión en el ala considerada, calculado a partir del valor crítico de la envolvente de momentos (N-mm). M_2 deberá corresponder a las cargas mayoradas y siempre se deberá considerar positivo. Si el momento es nulo o provoca tracción en ambos extremos de la longitud no arriostrada del ala considerada, M_2 se deberá tomar igual a cero.

beneficioso.

La Ecuación 9 se tomó de El Darwish y Johnston (1965) y proporciona una buena aproximación de la constante de torsión de Saint-Venant, J , despreciando el efecto de los chaflanes entre alma y ala. Para un ala de compresión o tracción en la cual la relación $b_f/2t_f$ es mayor que 7.5, para dicha ala el término entre paréntesis de la Ecuación 9 se puede tomar igual a uno. Las ecuaciones de El Darwish y Johnston (1965) que se emplean en AISC (1999) para calcular los valores de J considerando el efecto de los chaflanes entre alma y ala se incluyen en Seaburg y Carter (1997).

El Ingeniero debería observar la importancia del término $D_c t_w$ de la Ecuación 10, el cual corresponde al alma. Con frecuencia las especificaciones anteriores solo utilizaban el radio de giro del ala de compresión, $r_{yc} = b_{fc} / \sqrt{12}$, en las ecuaciones de diseño para pandeo lateral torsional. Esta aproximación puede llevar a pronósticos significativamente no conservadores si se los compara con resultados experimentales y análisis por elementos finitos. El término de la Ecuación 10 correspondiente al alma toma en cuenta los efectos desestabilizadores de la compresión por flexión dentro del alma.

El efecto de la variación del momento sobre la longitud entre puntos de arriostramiento se toma en cuenta usando el modificador del gradiente de momentos, C_b . El Artículo C6.10.8.2.3 contiene una discusión detallada del parámetro C_b . Este artículo también incluye lineamientos acerca de cómo tratar longitudes no arriostradas en las cuales el elemento es no prismático. Estos lineamientos son igualmente aplicables a los tipos de secciones discutidas en el presente artículo con la siguiente excepción. Para longitudes no arriostradas que contienen una transición hacia una sección de menor tamaño a una distancia mayor que 20 por ciento de la longitud arriostrada a partir del punto de arriostramiento que tiene el menor momento, la resistencia al pandeo lateral torsional, M_{nc} se deberá tomar como la menor resistencia en la longitud no arriostrada considerada multiplicada por la relación entre S_{xc} en la sección considerada y S_{xc} en la sección que determina la resistencia al pandeo lateral torsional.

Cuando C_b es mayor que 1.0, lo que indica la presencia de un gradiente de momentos, alternativamente las resistencias al pandeo lateral torsional se pueden calcular mediante los procedimientos equivalentes especificados en el Artículo D6.4.2. Tanto las ecuaciones de este artículo como las del Artículo D6.4.2 permiten alcanzar M_{max} de la Figura C6.10.8.2.1-1 para longitudes no arriostradas más largas cuando C_b es mayor que 1.0. Los procedimientos del Artículo D6.4.2 permiten que el Ingeniero se concentre directamente en la máxima longitud no arriostrada en la cual la resistencia a la flexión es igual a M_{max} . Cuando en

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

el diseño se utilicen valores de C_b mayores que 1.0 se recomienda fuertemente utilizar estos procedimientos equivalentes.

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_h = factor de hibridez determinado como se especifica en el Artículo 6.10.1.10.1

R_{pc} = factor de plastificación del alma para el ala de compresión determinado como se especifica en los Artículos A6.2.1 o A6.2.2, según corresponda

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm³)

S_{xt} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} (mm³)

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento está formado por secciones monosimétricas no compuestas y está sujeto a flexión con curvatura doble, a menos que se considere que el ala superior tiene apoyo lateral continuo se deberá verificar la resistencia al pandeo lateral torsional de ambas alas.

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento es no prismático, la resistencia a la flexión basada en el pandeo lateral torsional se puede tomar como la menor resistencia dentro de la longitud no arriostrada bajo consideración determinada mediante las Ecuaciones 1, 2 o 3, según corresponda, asumiendo que la longitud no arriostrada es prismática. Para longitudes no arriostradas que contienen una transición hacia una sección de menor tamaño a una distancia menor o igual que 20 por ciento de la longitud arriostrada a partir del punto de arriostramiento que tiene el menor momento, la resistencia a la flexión basada en el pandeo lateral torsional se puede determinar asumiendo que la transición hacia la sección de menor tamaño no existe.

A6.4 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BASADA EN LA FLUENCIA DEL ALA DE TRACCIÓN

La resistencia nominal a la flexión basada en la fluencia del ala de tracción se deberá tomar como:

$$M_{nt} = R_{pt} M_{yt} \quad (\text{A6.4-1})$$

donde:

CA6.4

La Ecuación 1 introduce una transición lineal en la resistencia a la flexión entre M_p y M_{yt} en función de $2D_c/t_w$ para secciones monosimétricas que tienen un ala de tracción de mayor tamaño y para secciones compuestas en flexión negativa en las cuales la primera fluencia ocurre en el ala superior o en el acero de las armaduras

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

R_{pt} = factor de plastificación del alma para fluencia del ala de tracción determinado como se especifica en los Artículos A6.2.1 o A6.2.2, según corresponda

longitudinales. Cuando $2D_c/t_w$ se aproxima al límite para alma no compacto dado por la Ecuación A6.2.2-3, la Ecuación 1 se reduce al límite para fluencia del ala de tracción especificado en el Artículo 6.10.8.3.

En las secciones en las cuales $M_{yt} > M_{yc}$ la Ecuación 1 no resulta determinante y por lo tanto no es necesario verificarla.

APÉNDICE B - REDISTRIBUCIÓN DE MOMENTOS A PARTIR DE LAS SECCIONES SOBRE PILAS INTERIORES EN PUENTES CONTINUOS

B6.1 DISPOSICIONES GENERALES

Este artículo se deberá aplicar para calcular los momentos de redistribución de las secciones sobre pilas interiores de los elementos de sección doble T continuos solicitados a flexión en los estados límites de servicio y/o resistencia. Estos requisitos se deberán aplicar solo para los elementos de sección doble T que satisfagan los requisitos del Artículo B6.2.

CB6.1

Estos requisitos opcionales reemplazan la regla que estipulaba la redistribución del diez por ciento incluida en ediciones anteriores de las Especificaciones, y proporcionan un enfoque simple y más racional para calcular el porcentaje de redistribución en las secciones sobre pilas interiores. Este enfoque utiliza envolventes de momentos elásticos y no requiere el uso directo de ningún método de análisis inelástico. Las restricciones del Artículo B6.2 aseguran que las secciones sobre las pilas interiores tengan suficiente ductilidad y robustez.

Típicamente las envolventes de momentos y cortes se determinan mediante análisis elástico sin ninguna redistribución por los efectos de fluencia considerados. Por lo tanto, típicamente las secciones se dimensionan para una resistencia mayor o igual que la requerida por las envolventes. Los diseños realizados para satisfacer estos requisitos muchas veces requieren la adición de cubrejuntas en las vigas laminadas, lo cual introduce detalles que suelen tener baja resistencia a la fatiga, o el uso de múltiples transiciones en las alas de las vigas soldadas, lo cual puede elevar los costos de fabricación. Cuando resulte apropiado, el uso de estos requisitos para tomar en cuenta la redistribución de momentos hace que sea posible eliminar tales detalles usando secciones prismáticas en toda la longitud del puente o entre empalmes realizados en obra. Esta práctica puede mejorar la resistencia global a la fatiga y lograr ahorros significativos en el rubro fabricación.

El desarrollo de estos requisitos está documentado en una serie de exhaustivos informes (*Barker et al. 1997; Schilling et al. 1997; White et al. 1997*) y en un trabajo técnico de Barth et al. (2004) que contiene una gran cantidad de referencias a otras investigaciones relacionadas. Estos requisitos toman en cuenta el hecho de que la esbeltez del ala de compresión, $b_{fc}/2t_{fc}$, y la relación de aspecto de la sección transversal, D/b_{fc} , son los principales factores que afectan el comportamiento momento-rotación en las secciones sobre pilas interiores correctamente arriostradas. Los requisitos se aplican a las secciones con almas compactas, no compactas o esbeltas.

B6.2 CAMPO DE APLICACIÓN

La redistribución de momentos solo se deberá aplicar en elementos de sección doble T rectos continuos cuyas líneas de apoyo no tengan una oblicuidad mayor que 10 grados respecto de una recta radial y a lo largo de la cual no hayan marcos transversales alternados. Las secciones pueden ser tanto compuestas como no compuestas en flexión positiva o

CB6.2

Estos procedimientos fueron desarrollados predominantemente en el contexto de superestructuras de puentes rectos, sin oblicuidad y sin marcos transversales alternados. Por este motivo su uso se restringe a puentes que no se desvían significativamente de estas condiciones idealizadas.

El desarrollo de estos requisitos se realizó estudiando

negativa.

Las secciones transversales en las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a las secciones sobre una pila interior a partir de las cuales se redistribuyen los momentos deberán tener una resistencia a la fluencia mínima especificada menor o igual que 485 MPa. No deberá haber orificios en el ala traccionada en una distancia igual a dos veces la profundidad del alma a cualquiera de los lados de una sección sobre una pila interior desde la cual se redistribuyen momentos. Todas las demás secciones que tengan orificios en el ala de tracción deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.1.8 después que los momentos se hayan redistribuidos.

Los momentos se deberán redistribuir solamente en las secciones sobre pilas interiores para las cuales las secciones transversales en la totalidad de las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a dichas secciones satisfacen los requisitos de los Artículos B6.2.1 a B6.2.6. Si para calcular los momentos de redistribución se utiliza el método refinado del Artículo B6.6, no es necesario que todas las secciones sobre las pilas interiores satisfagan estos requisitos; sin embargo, no se deberán redistribuir momentos de secciones que no satisfacen estos requisitos. En lugar de ello, después de la redistribución dichas secciones deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.10.4.2, 6.10.8.1 o el Artículo A6.1, según corresponda. Si para calcular los momentos de redistribución en las pilas interiores se utilizan los requisitos de los Artículos B6.3 o B6.4, las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a todas las secciones sobre las pilas interiores deberán satisfacer los requisitos de los Artículos B6.2.1 a B6.2.6.

B6.2.1 Dimensiones del alma

Dentro de la longitud no arriostrada considerada, el alma se deberá dimensionar de manera que:

$$\frac{D}{t_w} \leq 150 \quad (\text{B6.2.1-1})$$

$$\frac{2D_c}{t_w} \leq 6.8 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{B6.2.1-2})$$

y

$$D_{cp} \leq 0.75D \quad (\text{B6.2.1-3})$$

donde:

D_c = profundidad del alma en compresión en el rango elástico (mm). Para las secciones compuestas D_c se

vigas no híbridas e híbridas con resistencias a la fluencia mínimas especificadas menores o iguales que 485 MPa, y por este motivo no se permite utilizar estos requisitos con resistencias a la fluencia más elevadas. No se conoce en profundidad el efecto de los orificios en las alas de tracción sobre la potencial fractura de la sección neta en las secciones transversales que experimentan deformaciones inelásticas significativas. Por lo tanto, no se permite que en las alas de tracción haya orificios en una distancia igual a dos veces la profundidad del alma, D , a cualquiera de los lados de una sección sobre una pila interior desde la cual se redistribuyen momentos. La distancia $2D$ es un límite superior aproximado para la longitud de respuesta inelástica primaria en estas secciones.

A menos que se realice un análisis mediante el Método Refinado descrito en el Artículo B6.6, todas las secciones sobre las pilas interiores de un elemento continuo deben satisfacer los requisitos de los Artículos B6.2.1 a B6.2.6 para poder redistribuir los momentos en las pilas. Esto se debe a las aproximaciones que involucran los requisitos simplificados de los Artículos B6.3 y B6.4 y al hecho de que los momentos de redistribución inelásticos de un apoyo interior generalmente producen algunos momentos de redistribución no nulos en todos los apoyos interiores.

Si el puente tiene estribos integrales, se debe usar el Método Refinado descrito en el Artículo B6.6 y la sección de acero en los estribos integrales se debe mantener elástica para evitar los potenciales daños a los estribos que podrían provocar las rotaciones inelásticas de la sección de acero.

CB6.2.1

La Ecuación 1 simplemente es una expresión paralela a la Ecuación 6.10.2.1.1-1, y su intención es eliminar la consideración de cualquier aporte de la rigidización longitudinal del alma en la sección sobre la pila. Las características momento-rotación de las secciones con rigidizadores de alma longitudinales no han sido estudiadas. Las Ecuaciones 2 y 3 corresponden a los límites de esbeltez y profundidad comprimida del alma considerados al desarrollar estos procedimientos.

deberá determinar como se especifica en el Artículo D6.3.1.

D_{cp} = profundidad del alma comprimida cuando se produce el momento plástico determinada como se especifica en el Artículo D6.3.2 (mm)

B6.2.2 Dimensiones del ala de compresión

Dentro de la longitud no arriostrada considerada, el ala de compresión se deberá dimensionar de manera que:

$$\frac{b_{fc}}{2t_{fc}} \leq 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{B6.2.2-1})$$

y:

$$b_{fc} \geq \frac{D}{4.25} \quad (\text{B6.2.2-2})$$

B6.2.3 Transiciones entre diferentes secciones

Dentro de la longitud no arriostrada considerada, los elementos de sección doble Te de acero deberán ser prismáticos.

B6.2.4 Arriostramiento lateral

La longitud no arriostrada considerada deberá satisfacer:

$$L_b \leq \left[0.1 - 0.06 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \right] \frac{r_t E}{F_{yc}} \quad (\text{B6.2.4-1})$$

donde:

L_b = longitud no arriostrada (mm)

M_1 = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal en el punto de arriostramiento con el menor momento debido a las cargas mayoradas, tomado ya sea como el valor máximo o mínimo de la envolvente de momentos, cualquiera sea el valor que produzca la menor longitud no arriostrada admisible (N-mm)

CB6.2.2

Dentro de las longitudes no arriostradas adyacentes a la sección sobre la pila el ala de compresión debe satisfacer el límite de compacidad. Este límite se establece en la Ecuación 1. En las investigaciones en las cuales se apoyan estos requisitos se consideraron valores de $b_{fc}/2t_{fc}$ ligeramente mayores que este límite. El límite de compacidad de los Artículos A6.3.2 y 6.10.8.2 se utiliza por motivos de simplicidad.

La Ecuación 2 representa la mayor relación de aspecto $D/b_{fc} = 4.25$ considerada en las investigaciones que respaldan estos requisitos. Como se observa en los Artículos C6.10.2.2 y CB6.1, valores más elevados de esta relación tienen un efecto negativo sobre la resistencia y las características momento-rotación de los elementos de sección doble Te.

CB6.2.3

En las investigaciones en que se basan estos requisitos solamente se consideraron elementos que eran prismáticos en las longitudes no arriostradas adyacentes a las pilas interiores. Por lo tanto, en estas regiones se prohíben las transiciones entre diferentes secciones.

CB6.2.4

La Ecuación 1 da aproximadamente los mismos resultados que los requisitos de arriostramiento para las alas de compresión de las secciones compactas del Artículo 6.10.4.1.7 de AASHTO (1998), pero está expresada en términos de r_t y no de r_y . El uso de r_y en las ecuaciones anteriores originaba una ambigüedad en la aplicación de este límite de arriostramiento para las secciones compuestas en flexión negativa. Además, debido a que r_t se concentra estrictamente en la región comprimida de la sección transversal y no involucra el ala superior ni el tablero para una sección compuesta en flexión negativa, se cree que considera los requisitos de arriostramiento para este tipo de secciones de una manera mucho más adecuada.

Debido a que en la proximidad de las secciones sobre las pilas interiores la envolvente de los momentos negativos siempre tiende a ser cóncava, no es necesario considerar los valores del momento a la mitad de la longitud no arriostrada, tal como generalmente lo requieren los

M_2 = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal en el punto de arriostramiento con el mayor momento debido a las cargas mayoradas, tomado como el valor crítico de la envolvente de momentos (N-mm)

r_t = radio de giro efectivo para pandeo lateral torsional en la longitud no arriostrada considerada determinado a partir de la Ecuación A6.3.3-10 (mm)

(M_1/M_2) se deberá considerar negativo cuando los momentos provoquen doble curvatura.

B6.2.5 Corte

Dentro de la longitud no arriostrada considerada, las almas con o sin rigidizadores transversales deberán satisfacer el siguiente requisito en el Estado Límite de Resistencia:

$$V_u \leq \phi_v V_{cr} \quad (\text{B6.2.5-1})$$

donde:

ϕ_v = factor de resistencia para corte especificado en el Artículo 6.5.4.2

V_u = corte en el alma debido a las cargas mayoradas (N)

V_{cr} = resistencia al pandeo por corte determinado en base a la Ecuación 6.10.9.2-1 para almas no rigidizadas y en base a la Ecuación 6.10.9.3.3-1 para almas rigidizadas (N)

B6.2.6 Rigidizadores de apoyo

En la sección sobre la pila interior considerada se deberán colocar rigidizadores de apoyo diseñados de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.11.2.

B6.3 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO

B6.3.1 Disposiciones generales

Se deberá aplicar la Combinación de Cargas para Estado Límite de Servicio II indicada en la Tabla 3.4.1-1.

B6.3.2 Flexión

B6.3.2.1 Adyacente a secciones sobre pilas interiores

Excepto que se deberá satisfacer el requisito de la

Artículos 6.10.8.2.3 y A6.3.3 para el cálculo de C_b . Considerar los efectos del gradiente de momentos en base a la relación entre los valores de los extremos, M_1/M_2 , es suficiente y conservador.

Si en las Ecuaciones 6.10.8.2.3-9 o A6.3.3-10 $D_c t_w / b_{fc} t_{fc}$ se toma igual a un valor representativo de 2.0 y F_{yc} se toma igual a 345 MPa, la Ecuación 1 se satisface cuando $L_b < 13b_{fc}$ para $M_1/M_2 = 0$ y $L_b < 9b_{fc}$ para $M_1/M_2 = 0.5$.

CB6.2.5

En la proximidad de las secciones sobre las pilas diseñadas para redistribución de los momentos flectores negativos no se permite utilizar la resistencia al corte postpandeo del alma ni la acción del campo de tensiones.

CB6.3.2.1

Al verificar la flecha permanente bajo la Combinación

Ecuación 6.10.4.2.2-4, en los tramos adyacentes a una sección sobre una pila interior no será necesario verificar los requisitos del Artículo 6.10.4.2 en una región que se extiende a partir de la sección sobre la pila interior que satisface los requisitos del Artículo B6.2 y la transición en el ala o punto de contraflexión bajo carga permanente, cualquiera sea el que esté más próximo.

de Cargas correspondiente al Estado Límite de Servicio II, se permite fluencia local en los apoyos interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2, lo que provoca una redistribución de momentos. Las flechas permanentes se controlan imponiendo el límite para las tensiones de las alas del Artículo 6.10.4.2 que corresponda en cada tramo adyacente en las secciones que se encuentran más lejos que la ubicación de la transición del ala o punto de contraflexión por carga permanente más cercano, cualquiera sea el que se encuentre más próximo al apoyo interior considerado, luego de la redistribución. Antes de realizar estas verificaciones los momentos de redistribución apropiados se deben sumar a los momentos elásticos debidos a las cargas para Estado Límite de Servicio II. El cálculo de los momentos de redistribución considera la influencia de la resistencia y ductilidad en las secciones sobre las pilas interiores. En consecuencia, no es necesario verificar los límites para la tensión de las alas del Artículo 6.10.4.2 dentro de las regiones que se extienden a ambos lados de la sección sobre la pila interior considerada hasta el punto más cercano citado anteriormente. Los requisitos del Apéndice B no pretenden relajar el requisito de la Ecuación 6.10.4.2.2-4. Este requisito se debería satisfacer en base a los momentos elásticos antes de la redistribución.

No se recomienda aumentar la contraflecha para tomar en cuenta las pequeñas deformaciones adicionales asociadas con la redistribución de los momentos en las secciones sobre las pilas interiores. Al ser ensayado en condición de exceso de carga, un puente a escala real que había sido diseñado para permitir la redistribución de los momentos negativos sufrió apenas flechas permanentes muy pequeñas (*Roeder y Eltvik 1985*).

B6.3.2.2 En todas las demás ubicaciones

Las secciones en todas las demás ubicaciones deberán satisfacer los requisitos del Artículo 6.10.4.2, según corresponda, luego de la redistribución. Para las secciones compuestas en flexión positiva, los momentos de redistribución se deberán aplicar a la sección compuesta a largo plazo al calcular las tensiones de flexión en la sección de acero. Para calcular las tensiones de flexión longitudinal en el tablero de hormigón debidas a los momentos de redistribución se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.1.1.1d.

Los momentos de redistribución se deberán calcular de acuerdo con los requisitos especificados en el Artículo B6.3.3 y se deberán sumar a los momentos elásticos debidos a las cargas correspondientes a Estado Límite de Servicio II.

B6.3.3 Momentos de redistribución

B6.3.3.1 En secciones sobre pilas interiores

CB6.3.2.2

De hecho, los momentos de redistribución son momentos permanentes que permanecen en la estructura. Las correspondientes tensiones de redistribución residuales en las secciones compuestas tienden a disminuir con el tiempo como consecuencia de la fluencia lenta del hormigón.

Sin embargo, estas tensiones de redistribución pueden renovarse continuamente debido al sucesivo paso de cargas similares. Por lo tanto, las tensiones de flexión en la sección de acero debidas a estos momentos se deben calcular de forma conservadora en base a la sección compuesta a largo plazo.

CB6.3.3.1

En cada sección sobre una pila interior donde no se verifiquen las tensiones de flexión tal como lo permite el Artículo B6.3.2.1, el momento de redistribución para las cargas correspondientes al Estado Límite de Servicio II se deberá tomar como:

$$M_{rd} = |M_e| - M_{pe} \quad (\text{B6.3.3.1-1})$$

donde:

$$0 \leq M_{rd} \leq 0.2|M_e| \quad (\text{B6.3.3.1-2})$$

donde:

M_{pe} = momento plástico efectivo en flexión negativa para el Estado Límite de Servicio determinado como se especifica en el Artículo B6.5 (N-mm)

M_e = valor crítico de la envolvente de momentos elásticos en la sección sobre una pila interior debidos a las cargas correspondientes a Estado Límite de Servicio II (N-mm)

B6.3.3.2 En todas las demás ubicaciones

El diagrama de momentos de redistribución para la combinación de cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II se deberá determinar uniendo mediante líneas rectas los momentos de redistribución en las secciones sobre pilas interiores adyacentes. Estas líneas se deberán extender hasta cualquier punto de momento de redistribución nulo en los apoyos adyacentes, incluyendo los estribos.

Las Ecuaciones 1, B6.4.2.1-1 y B6.4.2.1-2 se basan en conceptos tomados del análisis de la adaptación plástica de vigas continuas bajo la aplicación repetida de cargas móviles (ASCE 1971; Schilling *et al.* 1997) usando un momento plástico efectivo que toma en cuenta las características momento-rotación de las secciones sobre pilas interiores. La adaptación plástica ("shakedown") es el estado límite apropiado relacionado con la redistribución de momentos en los puentes (Galambos *et al.* 1993).

En el Estado Límite de Servicio, el momento plástico efectivo de la Ecuación 1 se basa en un límite superior estimado para la rotación plástica de 0.009 radianes en las secciones sobre las pilas, determinado mediante un análisis inelástico directo de diferentes diseños de prueba (Schilling 1986). En la Ecuación 1 no se consideran los efectos de la flexión lateral de las alas ya que, debido a las restricciones del Artículo B6.2, bajo la Combinación de Cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II los efectos de la flexión lateral de las alas en los apoyos interiores se consideran despreciables. Por este motivo se considera que no se justifica refinar estos cálculos para considerar los efectos de la flexión lateral de las alas.

La intención de la Ecuación 2 es evitar que en una pila interior se utilice una sección tan pequeña que bajo condiciones de carga correspondientes a Estado Límite de Servicio II potencialmente pudiera violar el límite de rotación inelástica de 0.009 radianes. Observar que si no se satisface el límite superior dado por la Ecuación 2 se deberá seleccionar una nueva sección que asegure que el límite se satisfaga.

CB6.3.3.2

La Figura C1 ilustra un típico diagrama de momentos de redistribución para un elemento continuo de tres tramos para el cual los momentos de redistribución son mayores que cero en ambas secciones sobre las pilas interiores. Una vez que se retiran las sobrecargas, los momentos de redistribución se mantienen en equilibrio gracias a las reacciones de los apoyos. Por lo tanto, los momentos de redistribución deben variar linealmente entre los apoyos.

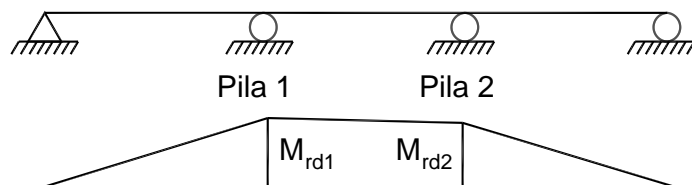


Figura CB6.3.3.2-1 Típico diagrama de momentos de redistribución.

B6.4 ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

B6.4.1 Resistencia a la flexión

B6.4.1.1 Adyacente a secciones sobre pilas interiores

No será necesario verificar las resistencias a la flexión de las secciones dentro de las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a las secciones sobre pilas interiores que satisfagan los requisitos del Artículo B6.2.

B6.4.1.2 En todas las demás ubicaciones

Las secciones en todas las demás ubicaciones deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.10.7, 6.10.8.1 o A6.1, según corresponda, luego de la redistribución. Para las secciones compuestas en flexión positiva, los momentos de redistribución se deberán aplicar a la sección compuesta a largo plazo al calcular las tensiones de flexión en la sección de acero. Para calcular las tensiones de flexión longitudinal en el tablero de hormigón debidas a los momentos de redistribución se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.1.1.1d.

Los momentos de redistribución se deberán calcular de acuerdo con los requisitos del Artículo B6.4.2 y se deberán sumar a los momentos elásticos debidos a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia.

B6.4.2 Momentos de redistribución

B6.4.2.1 En secciones sobre pilas interiores

En cada sección sobre una pila interior donde no se verifiquen las resistencias a la flexión tal como lo permite el Artículo B6.4.1.1, el momento de redistribución en el Estado Límite de Resistencia se deberá tomar como el mayor de los siguientes valores:

$$M_{rd} = |M_e| + \frac{1}{3} f_\ell S_{xc} - \phi_f M_{pe} \quad (\text{B6.4.2.1-1})$$

o bien:

$$M_{rd} = |M_e| + \frac{1}{3} f_\ell S_{xt} - \phi_f M_{pe} \quad (\text{B6.4.2.1-2})$$

donde:

$$0 \leq M_{rd} \leq 0.2 |M_e| \quad (\text{B6.4.2.1-3})$$

CB6.4.1.1

En el Estado Límite de Resistencia se permite la fluencia en los apoyos interiores, lo cual provoca una redistribución de momentos. El cálculo de los momentos de redistribución considera la influencia de la resistencia y ductilidad en las secciones sobre las pilas interiores. Por lo tanto, no será necesario verificar las resistencias a la flexión de las secciones dentro de las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a las secciones sobre pilas interiores desde las cuales se redistribuyan momentos.

CB6.4.1.2

Las regiones fuera de las longitudes no arriostradas inmediatamente adyacentes a las secciones sobre pilas interiores desde las cuales se redistribuyen los momentos se diseñan igual que si no se aplicaran los procedimientos de este artículo excepto que, antes de realizar las verificaciones del diseño, los correspondientes momentos de redistribución se deben sumar a los momentos elásticos debidos a las cargas mayoradas en el Estado Límite de Resistencia.

CB6.4.2.1

En el Estado Límite de Resistencia, el momento plástico efectivo de las Ecuaciones 1 y 2 se basa en un límite superior estimado para la rotación plástica de 0.03 radianes en las secciones sobre las pilas, determinado mediante un análisis inelástico directo de diferentes diseños de prueba (*Schilling 1986*).

De manera conservadora, las Ecuaciones 1 y 2 incluyen los efectos de la flexión lateral de las alas para tomar en cuenta cómo estos efectos reducen la resistencia a la flexión de una sección sobre una pila interior en el Estado Límite de Resistencia. La inclusión de f_ℓ en estas ecuaciones pretende fundamentalmente ocuparse del diseño para cargas de viento. La intención de la Ecuación 3 es evitar que en una pila interior se utilice una sección tan pequeña que en Estado Límite de Resistencia potencialmente pudiera violar la rotación inelástica límite de 0.03 radianes. Observar que

donde:

f_t = tensión de flexión lateral en el ala considerada en la sección sobre la pila interior (MPa). Para las alas de tracción o compresión con apoyo lateral continuo, f_t se deberá tomar igual a cero.

ϕ_f = factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2

M_{pe} = momento plástico efectivo en flexión negativa para el Estado Límite de Resistencia determinado como se especifica en el Artículo B6.5 (N-mm)

M_e = valor crítico de la envolvente de momentos elásticos en la sección sobre una pila interior debidos a las cargas mayoradas (N-mm)

M_{yc} = momento de fluencia con respecto al ala de compresión determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

M_{yt} = momento de fluencia con respecto al ala de tracción determinado como se especifica en el Artículo D6.2 (N-mm)

S_{xc} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de compresión tomado como M_{yc}/F_{yc} (mm³)

S_{xt} = módulo resistente elástico de la sección respecto del eje mayor de la sección hasta el ala de tracción tomado como M_{yt}/F_{yt} (mm³)

B6.4.2.2 En todas las demás secciones

El diagrama de momentos de redistribución para el Estado Límite de Resistencia se deberá determinar usando el mismo procedimiento especificado en el Artículo B6.3.3.2 para la combinación de cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II.

B6.5 MOMENTO PLÁSTICO EFECTIVO

B6.5.1 Secciones sobre pilas interiores con características momento-rotación mejoradas

Para las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 y que contienen:

- rigidizadores transversales con una separación menor o igual que $D/2$ en una distancia mínima igual a $D/2$ a cada lado de la sección sobre la pila interior

si no se satisface el límite superior dado por la Ecuación 3 se deberá seleccionar una nueva sección que asegure que el límite se satisfaga.

En la investigación original de Barker et al. (1997) se proponía una forma de las Ecuaciones 1 y 2 que incluía un factor de resistencia para adaptación plástica $\phi_{sd} = 1.1$. Para este estado límite se justifica el factor de resistencia $\phi_{sd} = 1.1$ porque la carga de adaptación plástica generalmente es menor que la máxima debido a que las flechas permanentes, las cuales aumentan progresivamente, constituyen una buena advertencia de una falla inminente. En estos requisitos se utiliza el factor de resistencia para flexión del Artículo 6.5.4.2 para tomar en cuenta el hecho de que no se considera la fluencia dentro de las regiones de flexión positiva y la correspondiente redistribución de los momentos flectores positivos hacia las secciones sobre pilas interiores. Además, tal como se discute en el Artículo C6.10.7.1.2, se especifican requisitos adicionales para los tramos continuos donde puede ocurrir una fluencia significativa antes que las secciones compactas en flexión positiva alcancen sus resistencias.

CB6.4.2.2

La Figura CB6.3.3.2-1 ilustra un típico diagrama de momentos de redistribución.

CB6.5.1

Ensayos realizados demuestran que los elementos con secciones sobre pilas interiores que además de los requisitos del Artículo B6.2 satisfacen cualquiera de los requisitos de este artículo tienen mejoras características momento-rotación que los elementos que solamente

o bien:

- almas ultracompactas que satisfacen:

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 2.3 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (\text{B6.5.1-1})$$

donde:

D_{cp} = profundidad del alma comprimida cuando se produce el momento plástico determinada como se especifica en el Artículo D6.3.2 (mm)

el momento plástico efectivo se deberá tomar como:

- Para el Estado Límite de Servicio:

$$M_{pe} = M_n \quad (\text{B6.5.1-2})$$

- Para el Estado Límite de Resistencia:

$$M_{pe} = \left(\begin{array}{l} 2.78 - 2.3 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \\ -0.35 \frac{D}{b_{fc}} + 0.39 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \frac{D}{b_{fc}} \end{array} \right) M_n \leq M_n \quad (\text{B6.5.1-3})$$

donde:

M_n = resistencia nominal a la flexión de la sección en la pila interior tomada como el menor valor entre $F_{nc}S_{xc}$ y $F_{nt}S_{xt}$, con F_{nc} y F_{nt} determinados como se especifica en el Artículo 6.10.8. Para las secciones con almas compactas o no compactas, M_n se puede tomar como el menor valor entre M_{nc} y M_{nt} determinados como se especifica en el Apéndice A (N-mm).

B6.5.2.1 Todas las demás secciones sobre pilas interiores

Para las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 pero que no satisfacen los requisitos del Artículo B6.5.1, el momento plástico efectivo se deberá tomar como:

- Para el Estado Límite de Servicio:

satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 (*White et al, 1997; Barth et al. 2004*). Estos requisitos adicionales implican el uso de:

- rigidizadores transversales próximos a la sección sobre la pila interior para ayudar a restringir las distorsiones por pandeo local del alma y el ala de compresión dentro de esta región,

o:

- un alma que sea lo suficientemente compacta como para que sus distorsiones sean reducidas y las distorsiones por pandeo local del ala estén altamente restringidas, denominada alma ultracompacta.

Para las secciones de alma no compacta y alma esbelta, la influencia de la esbeltez del alma sobre el momento plástico efectivo se captura a través del término correspondiente a la máxima resistencia a la flexión M_n en las Ecuaciones B6.5.2-1 y B6.5.2-2.

CB6.5.2

Las Ecuaciones 1 y 2 se basan en una estimación de límite inferior de las características de momento-rotación de las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 (*Barth et al. 2004*). Los casos con longitudes no arriostradas menores que el límite dado por la Ecuación B6.2.4-1, restricción significativa contra la torsión provista por un tablero compuesto, y/o valores de esbeltez del ala de compresión menores que el límite para alas compactas muchas veces exhiben características momento-rotación significativamente mejores y mayores

$$M_{pe} = \begin{pmatrix} 2.90 - 2.3 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \\ -0.35 \frac{D}{b_{fc}} + 0.39 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \frac{D}{b_{fc}} \end{pmatrix} M_n \leq M_n \quad (\text{B6.5.2-1})$$

- Para el Estado Límite de Resistencia:

$$M_{pe} = \begin{pmatrix} 2.63 - 2.3 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \\ -0.35 \frac{D}{b_{fc}} + 0.39 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \frac{D}{b_{fc}} \end{pmatrix} M_n \leq M_n \quad (\text{B6.5.2-2})$$

B6.6 MÉTODO REFINADO

B6.6.1 Disposiciones generales

Los elementos de sección doble T continuos que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 también se pueden dimensionar en base a un análisis directo. En este enfoque, los momentos de redistribución se deberán determinar respetando la continuidad rotacional y satisfaciendo las relaciones momento-rotación inelástica en las secciones sobre las pilas interiores seleccionadas. También se puede emplear un análisis directo en los estados límites de servicio y/o resistencia. En este análisis se deberá utilizar la envolvente de los momentos elásticos debidos a las cargas mayoradas.

Para el análisis directo, los momentos de redistribución se deberán determinar usando las propiedades elásticas de rigidez de la sección compuesta a corto plazo, suponiendo que el tablero de hormigón es efectivo en la totalidad de la longitud del tramo. Para las secciones compuestas en flexión positiva, al calcular las tensiones de flexión elásticas en la sección de acero los momentos de redistribución se deberán aplicar a la sección compuesta a largo plazo. Para calcular las tensiones elásticas de flexión longitudinal en el tablero de hormigón debidas a los momentos de redistribución se deberán aplicar los requisitos del Artículo 6.10.1.1.1d.

Las secciones adyacentes a las pilas interiores desde las cuales se redistribuyen momentos deberán satisfacer los requisitos del Artículo B6.3.2.1 en el Estado Límite de Servicio y del Artículo B6.4.1.1 en el Estado Límite de Resistencia. Todas las demás secciones deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.10.4.2, 6.10.7, 6.10.8.1 o A6.1 luego de encontrar una solución.

Al aplicar un análisis directo en el Estado Límite de Resistencia, las ordenadas de las curvas momento nominal-

mentos plásticos que los valores obtenidos a partir de estas ecuaciones.

El esbeltez del alma, $2D_c/t_w$ o $2D_{cp}/t_w$ no figura directamente en las Ecuaciones 1 y 2. Para las secciones con almas no compactas y esbeltas, la influencia de la esbeltez del alma sobre el momento plástico efectivo se toma en cuenta a través del término correspondiente a la máxima resistencia a la flexión M_n .

CB6.6.1

El Ingeniero también tiene la opción de usar un método refinado en el cual se realiza un análisis directo de la adaptación plástica en los estados límites de servicio y/o resistencia. Este análisis no es iterativo, pero requiere que se satisfagan simultáneamente la continuidad y las relaciones momento-rotación en todas las secciones sobre pilas internas desde las cuales se redistribuyen momentos. Si no se cuenta con un software que pueda manejar este tipo de cálculos y determinar las envolventes de los momentos elásticos, para realizar los cálculos que requiere el análisis se necesita una gran cantidad de trabajo manual. El Ingeniero puede lograr cierta ventaja adicional al utilizar el análisis directo, ya que en este caso se relaja la restricción que establece que todas las secciones del elemento sobre pilas interiores deben satisfacer los requisitos del Artículo B6.2.1. Además, las rotaciones inelásticas calculadas en forma directa en las secciones sobre pilas interiores tenderán a ser menores que los valores del límite superior en los cuales se basan las ecuaciones de los Artículos B6.3 a B6.5.

Debido a que los momentos de redistribución constituyen cargas a corto plazo, los momentos de redistribución se deben calcular usando las propiedades de rigidez de la sección compuesta a corto plazo.

Aunque es posible formular métodos de análisis directos que tomen en cuenta la redistribución de momentos de las regiones de flexión positiva, típicamente la redistribución de los momentos flectores positivos no reporta beneficios económicos significativos. Esto se debe a que en la mayoría de los casos prácticos las secciones sobre las pilas interiores son las que tienen las tensiones elásticas más elevadas. Además, el desarrollo de algo de rotación inelástica en estas

rotación se deberán multiplicar por el factor de resistencia para flexión especificado en el Artículo 6.5.4.2. Al aplicar un análisis directo en el Estado Límite de Servicio II se deberán utilizar las curvas de momento nominal-rotación directamente.

secciones simplemente permite que un elemento continuo responda de una manera que involucra apenas un poco menos de restricción contra la rotación provista por los tramos adyacentes que si estas secciones permanecieran elásticas.

Con la excepción de los requisitos adicionales del Artículo 6.10.7.1.2 para secciones compuestas sujetas a flexión positiva dentro de tramos continuos en los cuales las secciones sobre pilas interiores adyacentes no satisfacen el Artículo B6.2, estas Especificaciones generalmente desprecian la influencia de la fluencia parcial que ocurre con anterioridad y está asociada con el desarrollo de las resistencias máximas a la flexión de los elementos. Por lo tanto, en el enfoque del análisis directo también se desprecia la influencia de la fluencia parcial dentro de las regiones de flexión positiva sobre la redistribución de momentos a las pilas interiores y por lo tanto sobre las rotaciones inelásticas calculadas de las pilas. Los atributos no conservadores asociados con el hecho de despreciar la fluencia en momento positivo antes de alcanzar la máxima resistencia a la flexión en las regiones de flexión positiva son contrarrestados por:

- el uso de $\phi_f = 1.0$ en lugar del factor de resistencia para adaptación plástica $\phi_{sd} = 1.1$ según la formulación original de Barker et al. (1997) discutido en el Artículo CB6.4.2.1,

y:

- la naturaleza de límite inferior de las relaciones momento-rotación utilizadas para las secciones sobre las pilas internas.

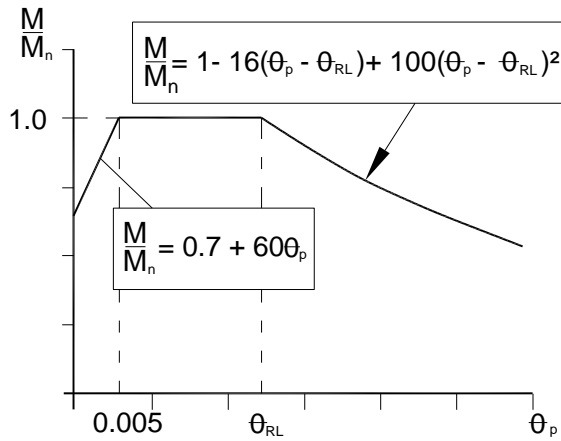
Se han propuesto relaciones momento-rotación que toman en cuenta la fluencia en flexión positiva, como por ejemplo en el trabajo de Barker et al. (1997). Sin embargo, estas relaciones toman en cuenta de una manera muy simplista los efectos de la fluencia distribuida que tienden a ocurrir en una longitud significativa debido a los pequeños gradientes de momento que típicamente existen dentro de las regiones de flexión positiva. Estos efectos se pueden considerar con un nivel de precisión significativamente mayor usando modelos de análisis de plasticidad distribuida en lugar de modelos basados en rótulas plásticas. Sin embargo, hoy en día este tipo de modelos de análisis no están fácilmente disponibles para los Ingenieros.

B6.6.2 Curvas momento nominal-rotación

En las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos de la Sección B6.2 se podrá utilizar la curva momento nominal-rotación ilustrada en la Figura 1.

CB6.6.2

El desarrollo de las relaciones momento-rotación incluidas en este artículo se describe detalladamente en White et al. (1997) y Barth et al. (2004). Las relaciones momento-rotación para secciones sobre pilas interiores con características momento-rotación mejoradas que satisfacen



los límites adicionales del Artículo B6.5.1 están dadas por la Ecuación 1, la cual se obtiene reemplazando el coeficiente 0.128 de la Ecuación 2 por 0.137 (*Barth et al. 2004*). Se anticipa que superar los límites del Artículo B6.2 puede provocar una degradación sustancial de las características momento-rotación en las pilas interiores. Por lo tanto, las restricciones del Artículo B6.2 no se pueden relajar usando relaciones momento-rotación alternativas.

Figura B6.6.2-1 Curva momento nominal-rotación para secciones sobre pilas internas que satisfacen el Artículo B6.2.

donde:

θ_{RL} = rotación plástica para la cual el momento en la sección en una pila interior nominalmente comienza a disminuir a medida que aumenta θ_p (radianes)

$$= 0.137 - 0.143 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} - 0.0216 \frac{D}{b_{fc}} + 0.0241 \frac{D}{b_{fc}} \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \quad (\text{B6.6.2-1})$$

para secciones que satisfacen los requisitos adicionales especificados en el Artículo B6.5.1, y

$$= 0.128 - 0.143 \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} - 0.0216 \frac{D}{b_{fc}} + 0.0241 \frac{D}{b_{fc}} \frac{b_{fc}}{t_{fc}} \sqrt{\frac{F_{yc}}{E}} \quad (\text{B6.6.2-2})$$

para todas las demás secciones.

donde:

θ_p = rotación plástica en la sección sobre una pila interior (radianes)

M = momento flector respecto del eje mayor de la sección transversal debido a las cargas mayoradas (N-mm)

M_n = resistencia nominal a la flexión de la sección sobre la pila interior tomada como el menor valor entre $F_{nc}S_{xc}$ y $F_{nt}S_{xt}$, con F_{nc} y F_{nt} determinados como se especifica en el Artículo 6.10.8 (N-mm). Para las secciones con almas compactas o no compactas, M_n se puede tomar como el menor valor entre M_{nc} y M_{nt}

determinados como se especifica en el Apéndice A. Para las combinaciones de cargas que inducen tensiones de flexión lateral significativas en las alas, la influencia de la flexión lateral de las alas se deberá

considerar restando el mayor valor entre $\frac{1}{3}f_{\ell}S_{xc}$ y

$\frac{1}{3}f_{\ell}S_{xt}$ de los valores anteriores.

f_{ℓ} = tensión de flexión lateral en el ala considerada en la sección sobre la pila interior (MPa). Para las alas de tracción o compresión con apoyo lateral continuo, f_{ℓ} se deberá tomar igual a cero.

Para las secciones sobre pilas interiores que satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 se pueden emplear otras relaciones momento nominal-rotación, siempre que estas relaciones se desarrollen considerando todos los factores que potencialmente afectan las características momento-rotación dentro de las restricciones de dichos requisitos.

El análisis deberá suponer que las secciones sobre pilas interiores que no satisfacen los requisitos del Artículo B6.2 permanecen elásticas y deberán satisfacer los requisitos de los Artículos 6.10.4.2, 6.10.8.1 o A6.1, según corresponda, luego de hallar una solución.

APÉNDICE C - CONCEPTOS BÁSICOS PARA LAS SUPERESTRUCTURAS DE LOS PUENTES DE ACERO

C6.1 DISPOSICIONES GENERALES

La intención de esta guía es presentar un panorama general del proceso de diseño. No se debe considerar como una guía completa, ni tampoco se debe utilizar en reemplazo de un conocimiento cabal de los requisitos de esta sección.

C6.2 CONSIDERACIONES GENERALES

- A. Filosofía de diseño (1.3.1)
- B. Estados límite (1.3.2)
- C. Características de diseño y ubicación (2.3) (2.5)

C6.3 DISEÑO DE LA SUPERESTRUCTURA

- A. Desarrollar la sección general
 - 1. Ancho de carretera (especificado por la autoridad competente)
 - 2. Disposición de los tramos (2.3.2) (2.5.4) (2.5.5) (2.6)
 - 3. Seleccionar tipo de puente – Se asume que será un puente de vigas doble Te o cajón
- B. Desarrollar sección típica
 - 1. Viga doble Te
 - a. Compuesta (6.10.1.1) o no compuesta (6.10.1.2)
 - b. Híbrida o no híbrida (6.10.1.3)
 - c. Profundidad de alma variable (6.10.1.4)
 - d. Limitaciones a las dimensiones de la sección transversal (6.10.2)
 - 2. Viga cajón
 - a. Cajones múltiples o cajón simple (6.11.1.1) (6.11.2.3)
 - b. Híbrida o no híbrida (6.10.1.3)
 - c. Profundidad de alma variable (6.10.1.4)
 - d. Limitaciones a las dimensiones de la sección transversal (6.11.2)
 - e. Apoyos (6.11.1.2)
 - f. Tablero ortótropo (6.14.3)
- C. Diseñar tablero de hormigón armado convencionalmente

1. Losas de tablero (4.6.2.1)
2. Profundidad mínima (9.7.1.1)
3. Diseño empírico (9.7.2)
4. Diseño tradicional (9.7.3)
5. Método de las fajas (4.6.2.1)
6. Aplicación de las sobrecargas (3.6.1.3.3) (4.6.2.1.4) (4.6.2.1.5)
7. Armadura de distribución (9.7.3.2)
8. Diseño del vuelo del tablero (A13.4) (3.6.1.3.4)
9. Mínima armadura para flexión negativa del tablero de hormigón (6.10.1.7)

D. Seleccionar factores de resistencia

1. Estado Límite de Resistencia (6.5.4.2)

E. Seleccionar modificadores de las cargas

1. Ductilidad (1.3.3)
2. Redundancia (1.3.4)
3. Importancia operativa (1.3.5)

F. Seleccionar combinaciones de cargas y factores de carga (3.4.1)

1. Estado Límite de Resistencia (6.5.4.1) (6.10.6.1) (6.11.6.1)
2. Estado Límite de Servicio (6.10.4.2.1)
3. Estado Límite de Fatiga y Fractura (6.5.3)

G. Calcular solicitaciones debidas a las sobrecargas

1. Seleccionar sobrecargas (3.6.1) y número de carriles (3.6.1.1.1)
2. Presencia de múltiples sobrecargas (3.6.1.1.2)
3. Incremento por carga dinámica (3.6.2)
4. Factor de distribución para momento (4.6.2.2.2)
 - a. Vigas interiores con tableros de hormigón (4.6.2.2.2b)
 - b. Vigas exteriores (4.6.2.2.2d)
 - c. Puentes oblicuos (4.6.2.2.2e)
5. Factor de distribución para corte (4.6.2.2.3)

- a. Vigas interiores (4.6.2.2.3a)
- b. Vigas exteriores (4.6.2.2.3d)
- c. Puentes oblicuos (4.6.2.2.3c)
- 6. Rigidez (6.10.1.5)
- 7. Efectos de las cargas de viento (4.6.2.7)
- 8. Reacciones a la subestructura (3.6)
- H. Calcular solicitaciones de otras cargas identificadas en el Paso C6.3.F
- I. Diseñar secciones requeridas – El ejemplo corresponde al diseño de una viga doble Te
 - 1. Diseño a flexión
 - a. Tensiones en la sección compuesta (6.10.1.1.1)
 - b. Tensiones en las alas y momentos flectores en el elemento (6.10.1.6)
 - c. Propiedades fundamentales de la sección (D6.1) (D6.2) (D6.3)
 - d. Construibilidad (6.10.3)
 - (1) Disposiciones generales (2.5.3) (6.10.3.1)
 - (2) Flexión (6.10.3.2) (6.10.1.8) (6.10.1.9) (6.10.1.10.1) (6.10.8.2) (A6.3.3 – opcional)
 - (3) Corte (6.10.3.3)
 - (4) Colocación del tablero (6.10.3.4)
 - (5) Deflexiones por cargas permanentes (6.10.3.5)
 - e. Estado Límite de Servicio (6.5.2) (6.10.4)
 - (1) Deformaciones elásticas (6.10.4.1)
 - (a) Criterios opcionales para control de las deflexiones debidas a las sobrecargas (2.5.2.6.2)
 - (b) Criterios opcionales para relaciones longitud de tramo / profundidad (2.5.2.6.3)
 - (2) Deformaciones permanentes (6.10.4.2)
 - (a) Disposiciones generales (6.10.4.2.1)
 - (b) Flexión (6.10.4.2.2) (Apéndice B – opcional) (6.10.1.9) (6.10.1.10.1)
 - f. Estado Límite de Fatiga y Fractura (6.5.3) (6.10.5)
 - (1) Fatiga (6.10.5.1) (6.6.1)
 - (2) Fractura (6.10.5.2) (6.6.2)
 - (3) Requisito especial sobre fatiga aplicable a las almas (6.10.5.3)

- g. Estado Límite de Resistencia (6.5.4) (6.10.6)
 - (1) Secciones compuestas en flexión positiva (6.10.6.2.2) (6.10.7)
 - (2) Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas (6.10.6.2.3) (6.10.8) (Apéndice A – opcional) (Apéndice B – opcional) (D6.4 - opcional)
 - (3) Fractura de la sección neta (6.10.1.8)
 - (4) Factores de reducción de la resistencia de las alas (6.10.1.10)

2. Diseño al corte

- a. Disposiciones generales (6.10.9.1)
- b. Alma no rigidizada (6.10.9.2)
- c. Alma rigidizada (6.10.9.3)
 - (1) Disposiciones generales (6.10.9.3.1)
 - (2) Paneles interiores (6.10.9.3.2)
 - (3) Paneles extremos (6.10.9.3.3)
- d. Diseño de los rigidizadores (6.10.11)
 - (1) Rigidizadores transversales intermedios (6.10.11.1)
 - (2) Rigidizadores de apoyo (6.10.11.2) (D6.5)
 - (3) Rigidizadores longitudinales (6.10.11.3)

3. Conectores de corte (6.10.10)

- a. Disposiciones generales (6.10.10.1)
- b. Resistencia a la fatiga (6.10.10.2)
- c. Requisitos especiales para puntos de contraflexión bajo carga permanente (6.10.10.3)
- d. Estado Límite de Resistencia (6.10.10.4)

J. Requisitos sobre dimensionado y detalles

- 1. Espesor de los materiales (6.7.3)
- 2. Uniones abulonadas (6.13.2)
 - a. Mínima capacidad de diseño (6.13.1)
 - b. Secciones netas (6.8.3)
 - c. Límites para la separación de los bulones (6.13.2.6)

- d. Resistencia de las uniones abulonadas antideslizantes (6.13.2.2) (6.13.2.8)
 - e. Resistencia al corte (6.13.2.7)
 - f. Resistencia al aplastamiento (6.13.2.9)
 - g. Resistencia a la tracción (6.13.2.10)
- 3. Uniones soldadas (6.13.3)
 - 4. Resistencia a la rotura de bloque de corte (6.13.4)
 - 5. Elementos de conexión (6.13.5)
 - 6. Empalmes (6.13.6)
 - a. Empalmes abulonados (6.13.6.1)
 - b. Empalmes soldados (6.13.6.2)
 - 7. Cubrejuntas (6.10.12)
 - 8. Diafragmas y marcos transversales (6.7.4)
 - 9. Arriostramiento lateral (6.7.5)

C6.4 DIAGRAMAS DE FLUJO PARA EL DISEÑO A FLEXIÓN DE SECCIONES DOBLE TE

C6.4.1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.3

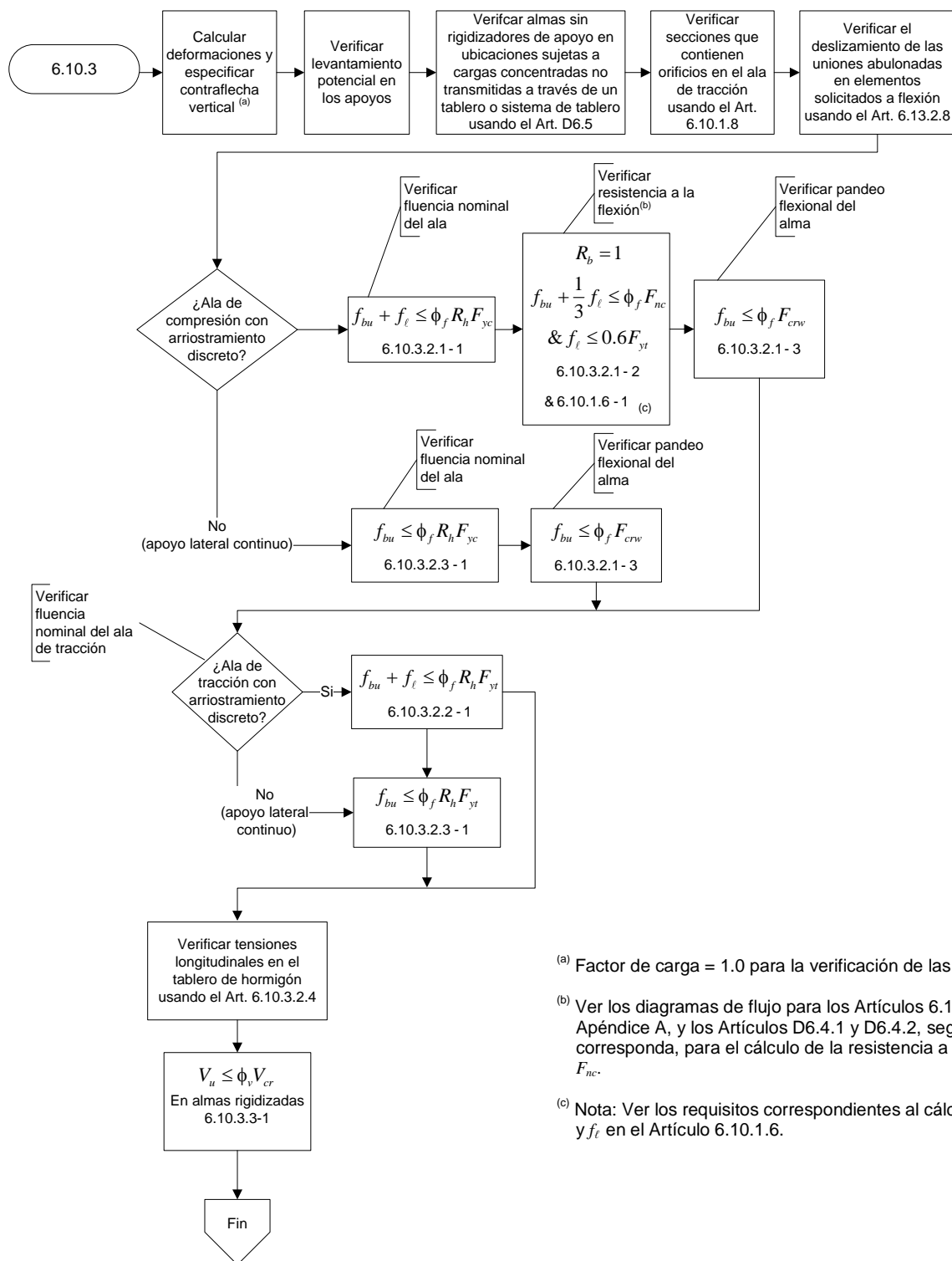


Figura C6.4.1-1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.3 – Construibilidad

C6.4.2 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.4

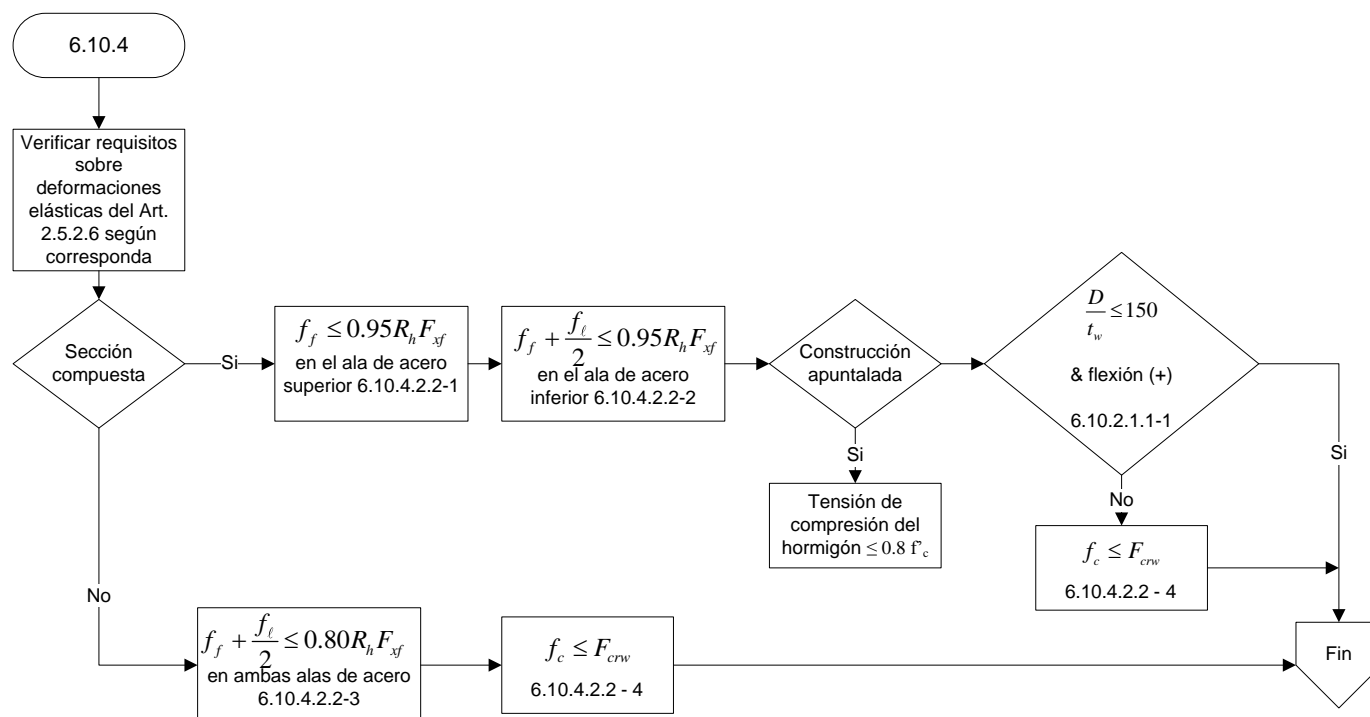


Figura C6.4.2-1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.4 – Estado Límite de Servicio

C6.4.3 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.5

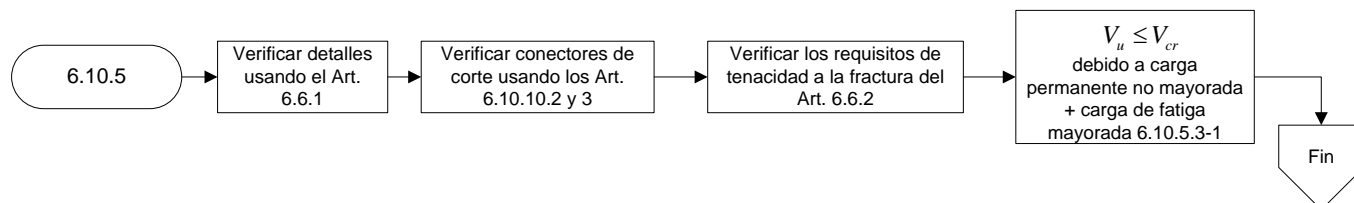
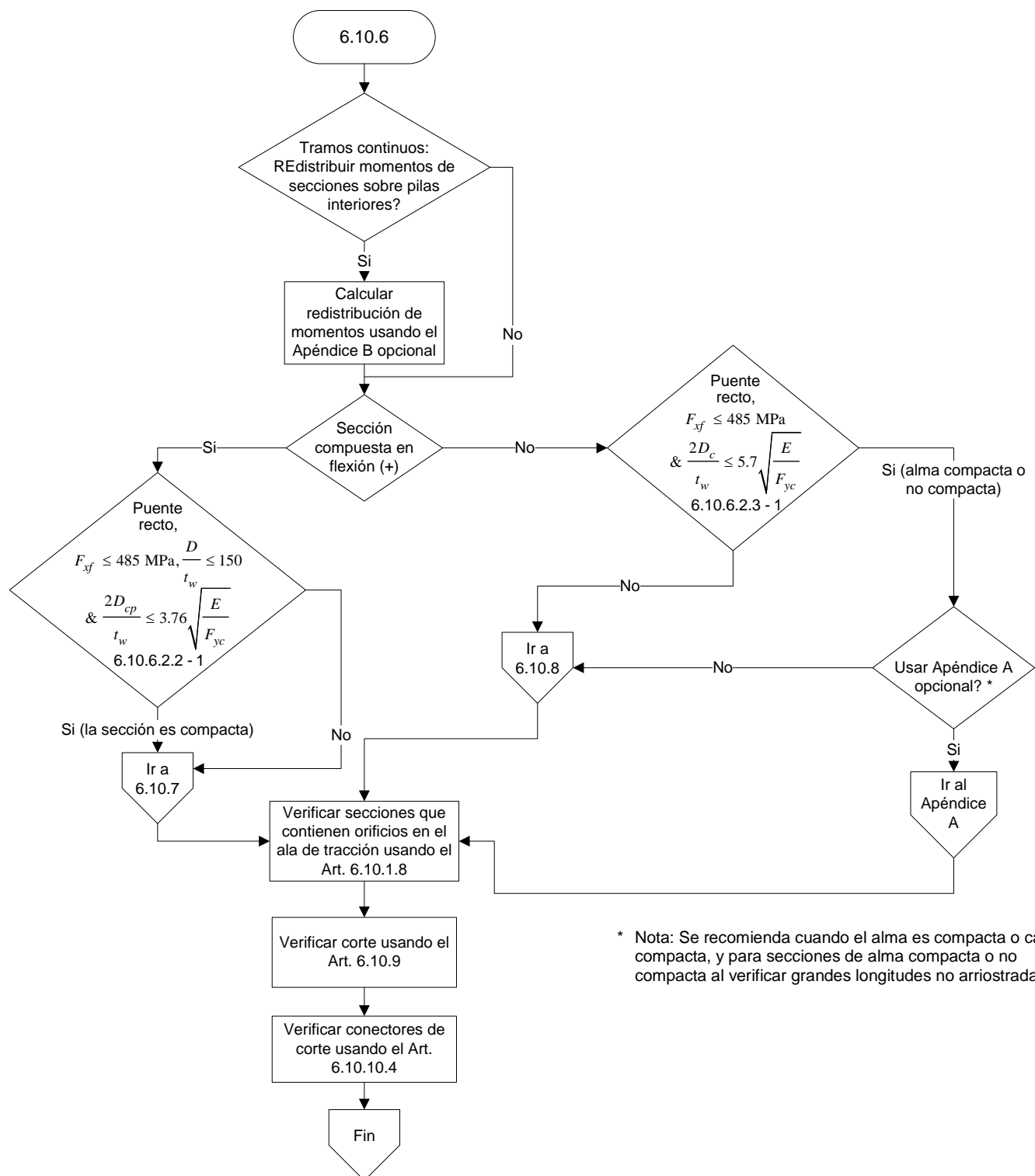


Figura C6.4.3-1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.5 – Estado Límite de Fatiga y Fractura

C6.4.4 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.6



* Nota: Se recomienda cuando el alma es compacta o casi compacta, y para secciones de alma compacta o no compacta al verificar grandes longitudes no arriostradas.

Figura C6.4.4-1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.6 – Estado Límite de Resistencia

C6.4.5 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.7

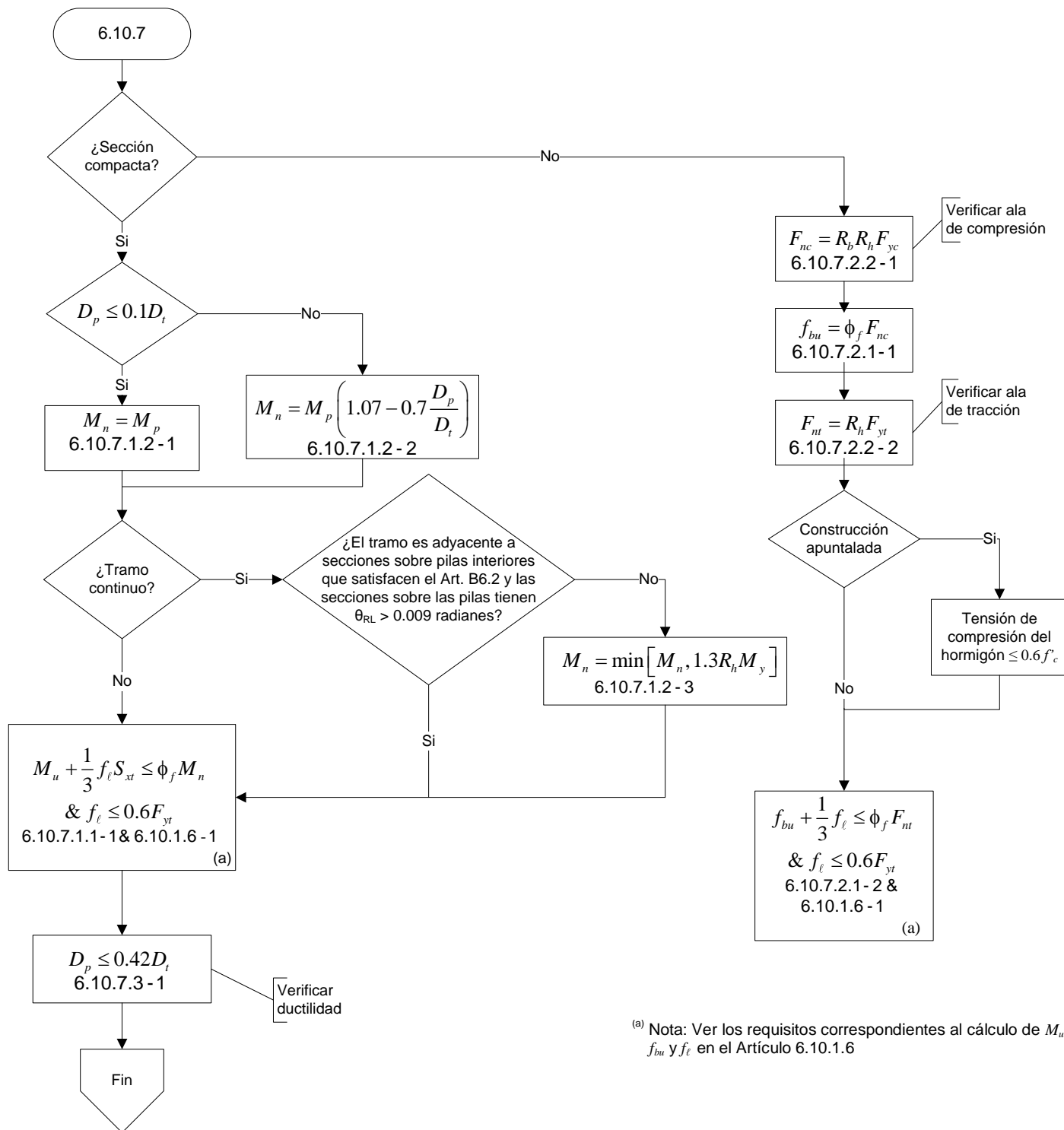


Figura C6.4.5-1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.7 – Secciones compuestas en flexión positiva.

C6.4.6 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.8

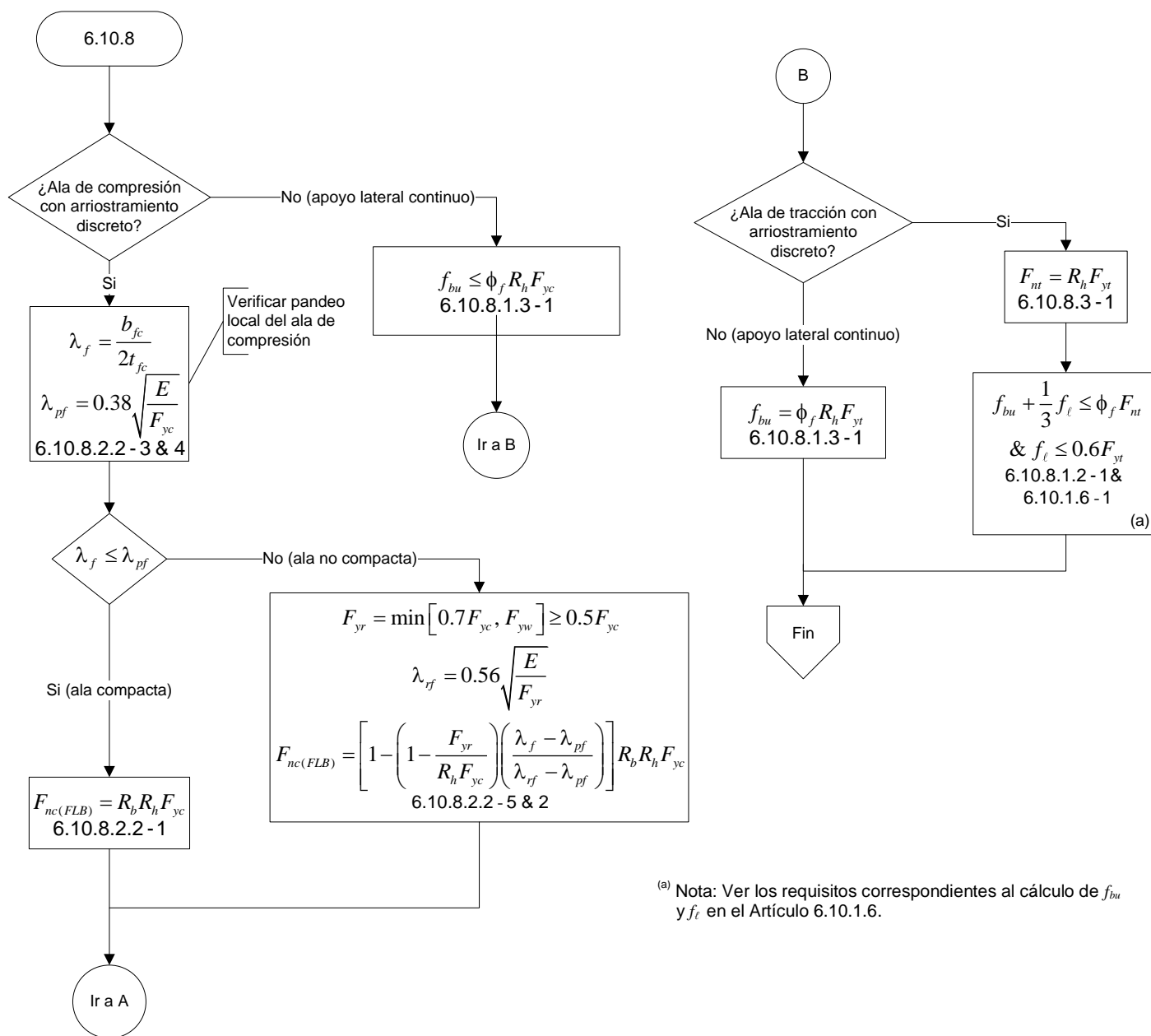


Figura C6.4.6-1 Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.8 – Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas.

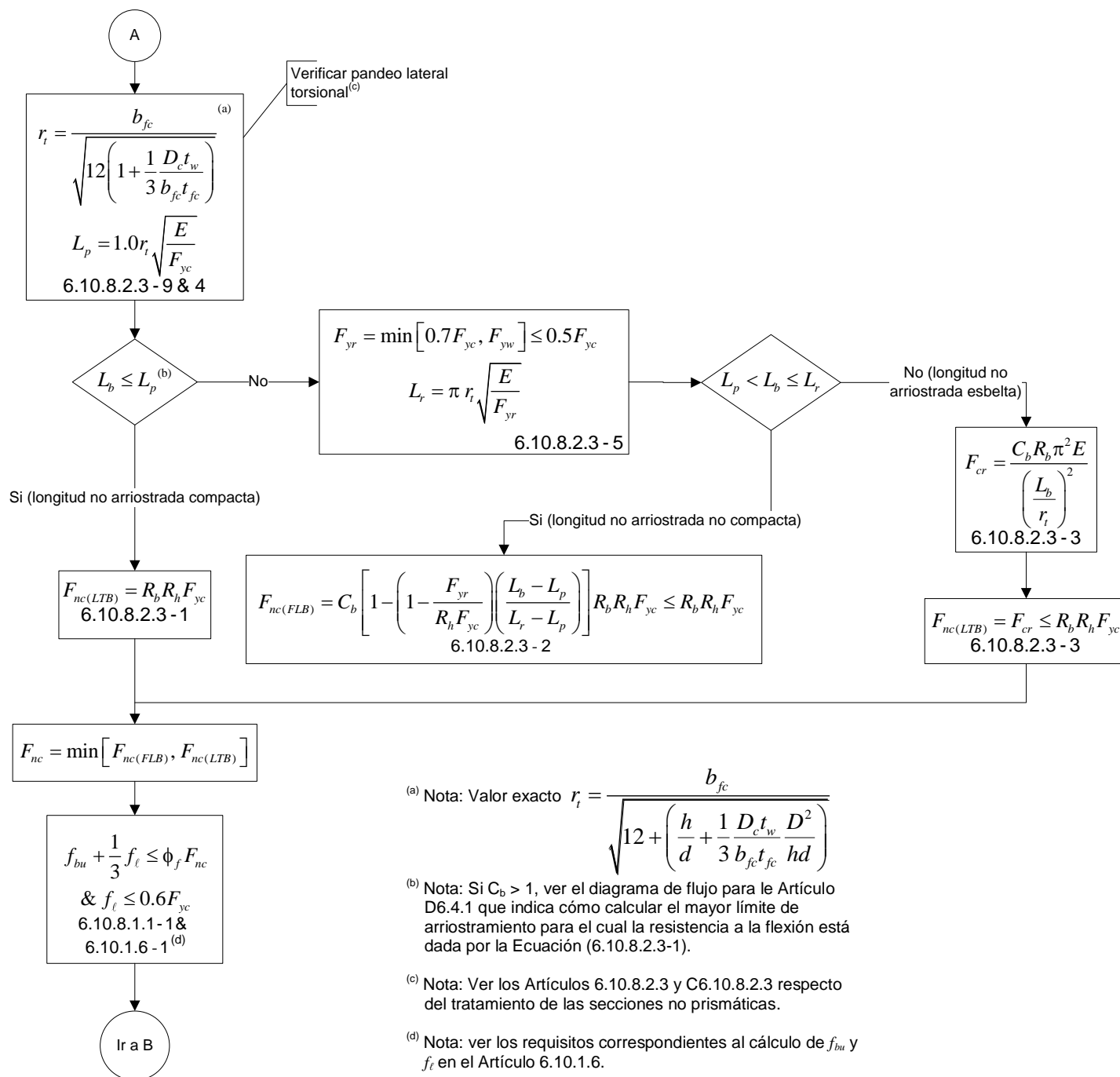


Figura C6.4.6-1 (cont.) Diagrama de flujo para el Artículo 6.10.8 – Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas.

C6.4.7 Diagrama de flujo para el Apéndice A

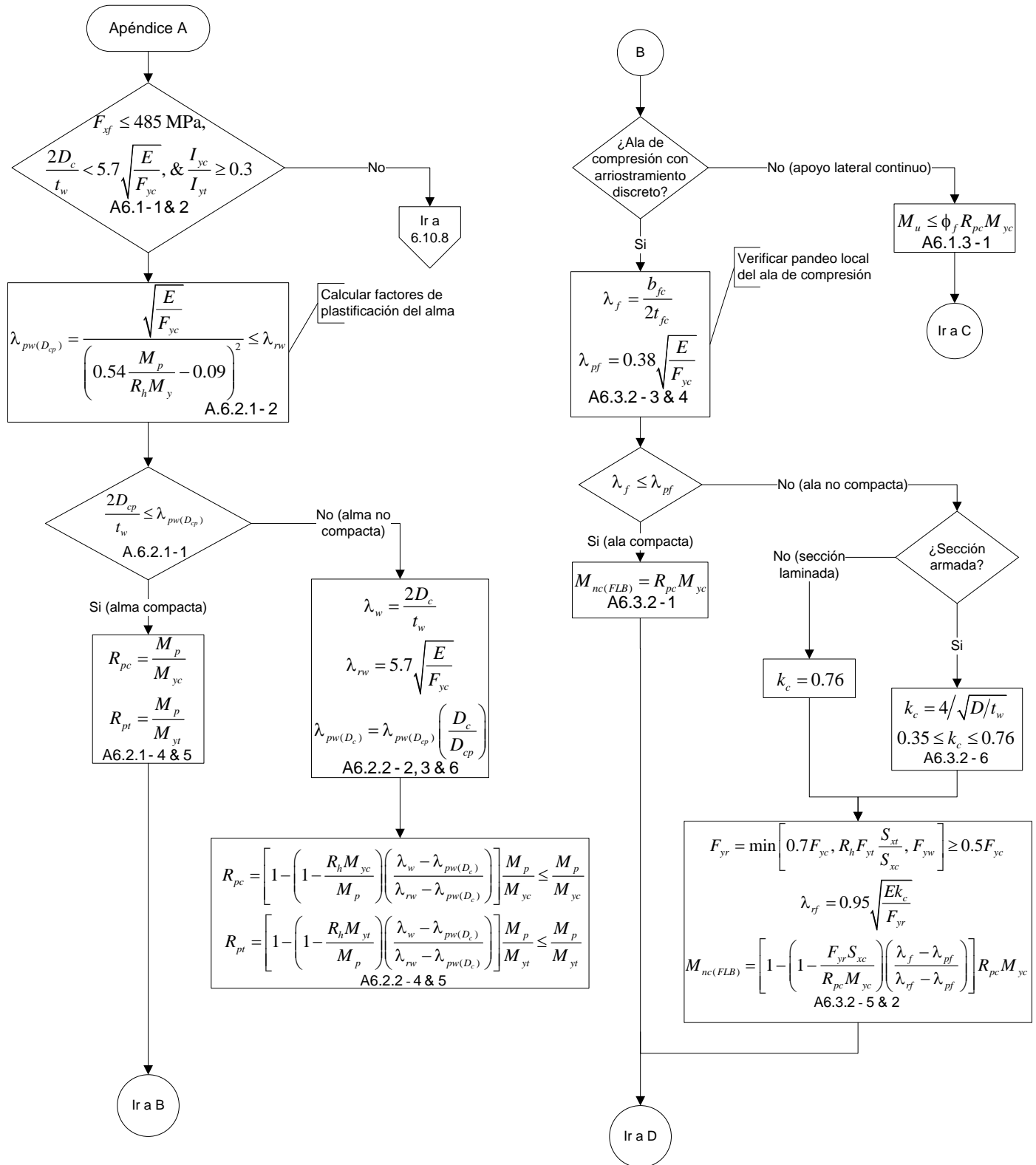


Figura C6.4.7-1 Diagrama de flujo para el Apéndice A – Resistencia a la flexión – Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas con almas compactas o no compactas.

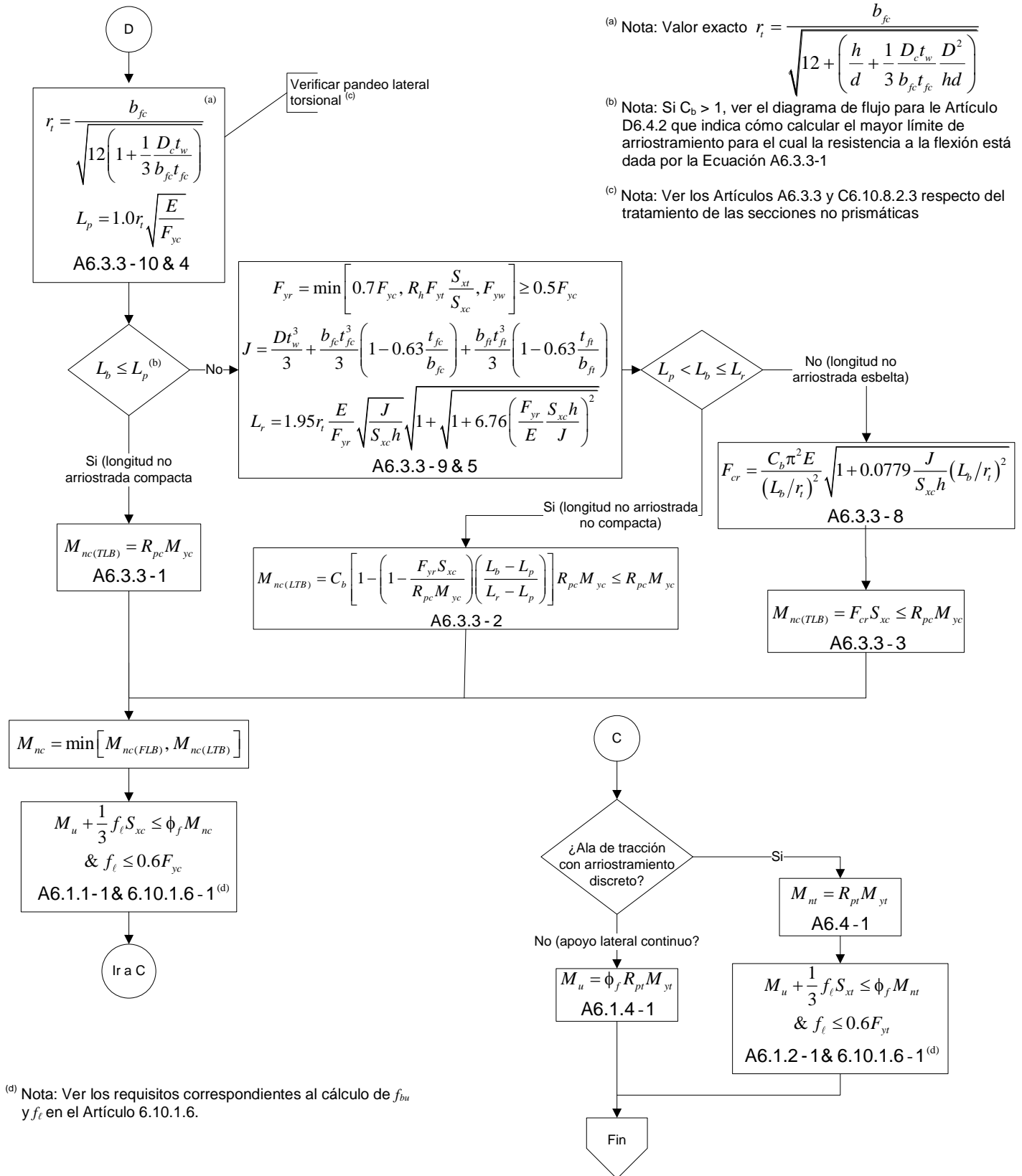


Figura C6.4.7-1 (cont.) Diagrama de flujo para el Apéndice A – Resistencia a la flexión – Secciones compuestas en flexión negativa y secciones no compuestas con almas compactas o no compactas.

C6.4.8 Diagrama de flujo para el Artículo D6.4.1

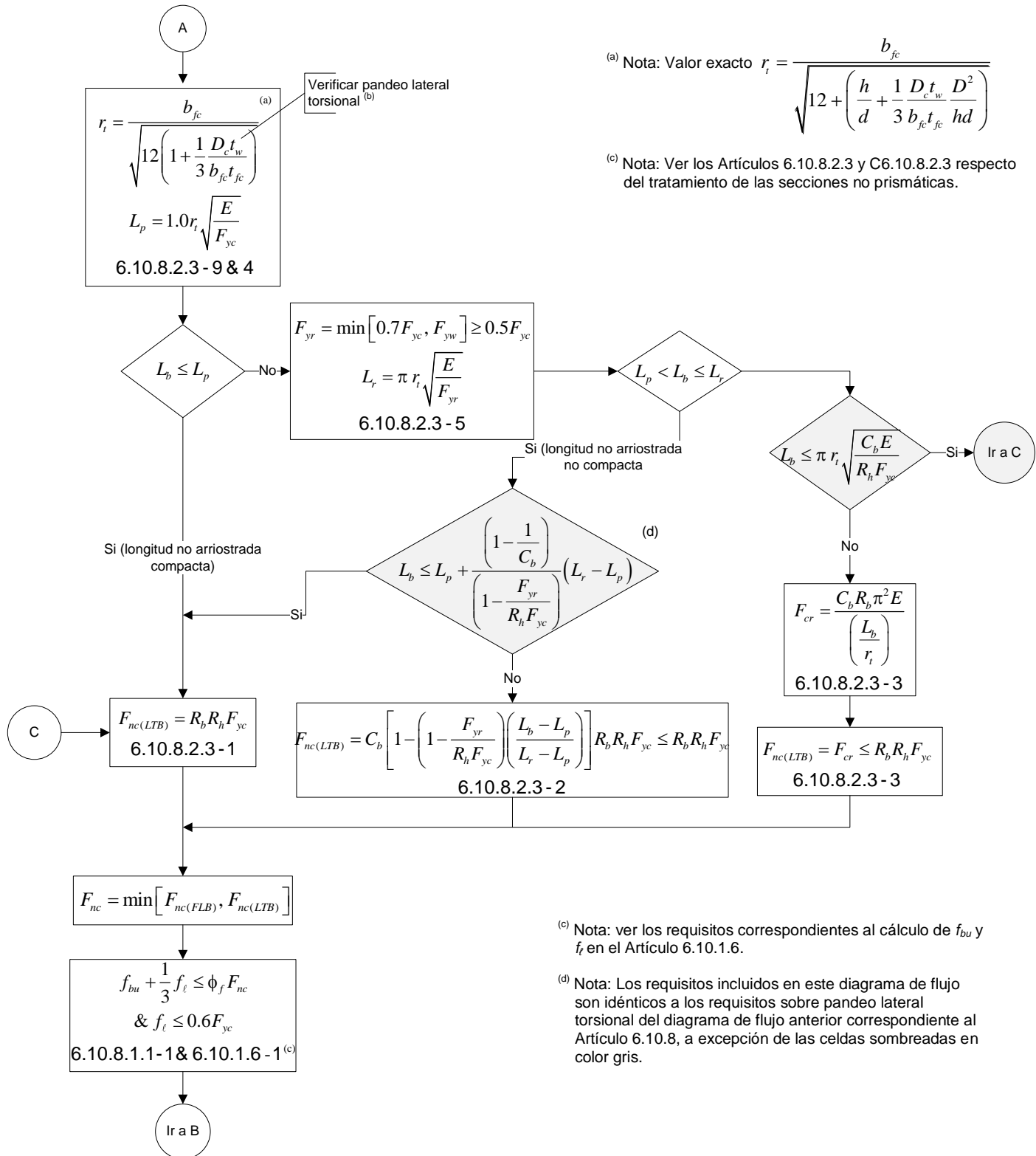
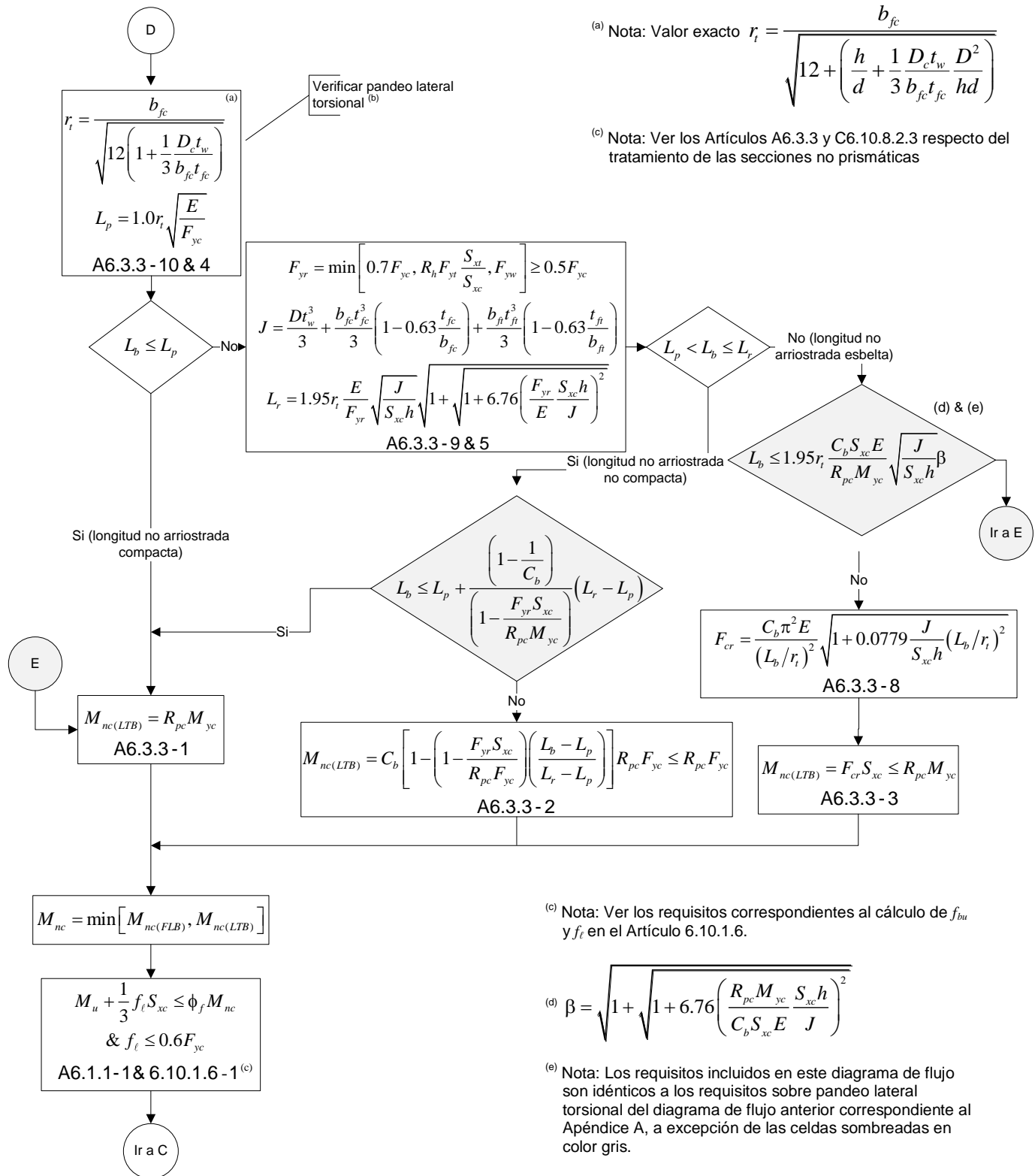


Figura C6.4.8-1 Diagrama de flujo para el Artículo D6.4.1 –Requisitos para pandeo lateral torsional del Artículo 6.10.8.2.3 con énfasis en los requisitos sobre longitud no arriostrada para el desarrollo de la máxima resistencia a la flexión.

C6.4.9 Diagrama de flujo para el Artículo D6.4.2



APÉNDICE D - CÁLCULOS FUNDAMENTALES PARA ELEMENTOS SOLICITADOS A FLEXIÓN

D6.1 MOMENTO PLÁSTICO

El momento plástico, M_p , se deberá calcular como el primer momento de las fuerzas plásticas respecto del eje neutro plástico. Las fuerzas en las porciones de acero de una sección transversal se deberán calcular usando las resistencias a la fluencia de las alas, el alma y las armaduras de acero, según corresponda. Las fuerzas plásticas en las porciones de hormigón de la sección transversal que están en compresión se pueden basar en un bloque rectangular de tensiones con una tensión de compresión de magnitud igual a $0.85 f'_c$. El hormigón traccionado se deberá despreciar.

La posición del eje neutro plástico se deberá determinar en base a la condición de equilibrio que establece que la fuerza axial neta debe ser nula.

El momento plástico de una sección compuesta en flexión positiva se puede determinar de la siguiente manera:

- Calcular las fuerzas en los elementos y usarlas para determinar si el eje neutro plástico se encuentra en el alma, el ala superior o el tablero de hormigón;
- Calcular la ubicación del eje neutro plástico dentro del elemento determinado en el primer paso, y
- Calcular M_p . En la Tabla 1 se indican las ecuaciones para los cinco casos más habituales en la práctica.

Las fuerzas en la armadura longitudinal se pueden despreciar de manera conservadora. Para hacerlo, en las ecuaciones que aparecen en la Tabla 1 P_{rb} y P_{rt} se deben igualar a cero.

El momento plástico de una sección compuesta en flexión negativa se puede calcular mediante un procedimiento análogo. En la Tabla 2 se indican las ecuaciones para los dos casos más habituales en la práctica.

El momento plástico de una sección no compuesta se puede calcular eliminando los términos correspondientes al tablero de hormigón y a la armadura longitudinal de las ecuaciones para secciones compuestas indicadas en las Tablas 1 y 2.

En las ecuaciones para M_p indicadas en las Tablas 1 y 2, d es la distancia desde una fuerza en un elemento hasta el eje neutro plástico. Las fuerzas en los elementos actúan (a) a la mitad del espesor de las alas y el tablero de hormigón, (b) a la mitad de la profundidad del alma, y (c) en el centro de las armaduras. Todas las fuerzas en los elementos, dimensiones y distancias se deberán considerar positivas. Las condiciones se deberían verificar en el orden en que aparecen listadas a continuación.

Tabla D6.1-1 Cálculo de \bar{Y} y M_p para secciones en flexión positiva.

| CASO | ENP [§] | CONDICIÓN | \bar{Y} , M_p |
|------|--|--|---|
| I | En el alma | $P_t + P_w \geq P_c + P_s + P_{rb} + P_{rt}$ | $\bar{Y} = \left(\frac{D}{2} \right) \left[\frac{P_t - P_c - P_s - P_{rt} - P_{rb}}{P_w} + 1 \right]$ $M_p = \frac{P_w}{2D} \left[\bar{Y}^2 + (D - \bar{Y})^2 \right] + [P_s d_s + P_{rt} d_{rt} + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_t d_t]$ |
| II | En el ala superior | $P_t + P_w + P_c \geq P_s + P_{rb} + P_{rt}$ | $\bar{Y} = \left(\frac{t_c}{2} \right) \left[\frac{P_w + P_t - P_s - P_{rt} - P_{rb}}{P_c} + 1 \right]$ $M_p = \frac{P_c}{2t_c} \left[\bar{Y}^2 + (t_c - \bar{Y})^2 \right] + [P_s d_s + P_{rt} d_{rt} + P_{rb} d_{rb} + P_w d_w + P_t d_t]$ |
| III | Tablero de hormigón, debajo de P_{rb} | $P_t + P_w + P_c \geq \left(\frac{C_{rb}}{t_s} \right) P_s + P_{rb} + P_{rt}$ | $\bar{Y} = (t_s) \left[\frac{P_c + P_w + P_t - P_{rt} - P_{rb}}{P_s} + 1 \right]$ $M_p = \left(\frac{\bar{Y}^2 P_s}{2t_s} \right) + [P_{rt} d_{rt} + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$ |
| IV | Tablero de hormigón, en P_{rb} | $P_t + P_w + P_c + P_{rb} \geq \left(\frac{C_{rb}}{t_s} \right) P_s + P_{rt}$ | $\bar{Y} = C_{rb}$ $M_p = \left(\frac{\bar{Y}^2 P_s}{2t_s} \right) + [P_{rt} d_{rt} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$ |
| V | Tablero de hormigón, encima de P_{rb} debajo de P_{rt} | $P_t + P_w + P_c + P_{rb} \geq \left(\frac{C_{rt}}{t_s} \right) P_s + P_{rt}$ | $\bar{Y} = (t_s) \left[\frac{P_{rb} + P_c + P_w + P_t - P_{rt}}{P_s} + 1 \right]$ $M_p = \left(\frac{\bar{Y}^2 P_s}{2t_s} \right) + [P_{rt} d_{rt} + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$ |
| VI | Tablero de hormigón, en P_{rt} | $P_t + P_w + P_c + P_{rb} \geq \left(\frac{C_{rb}}{t_s} \right) P_s + P_{rt}$ | $\bar{Y} = C_{rb}$ $M_p = \left(\frac{\bar{Y}^2 P_s}{2t_s} \right) + [P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$ |
| VII | Tablero de hormigón, encima de P_{rt} | $P_t + P_w + P_c + P_{rb} + P_{rt} < \left(\frac{C_{rt}}{t_s} \right) P_s$ | $\bar{Y} = (t_s) \left[\frac{P_{rb} + P_c + P_w + P_t - P_{rt}}{P_s} + 1 \right]$ $M_p = \left(\frac{\bar{Y}^2 P_s}{2t_s} \right) + [P_{rt} d_{rt} + P_{rb} d_{rb} + P_c d_c + P_w d_w + P_t d_t]$ |

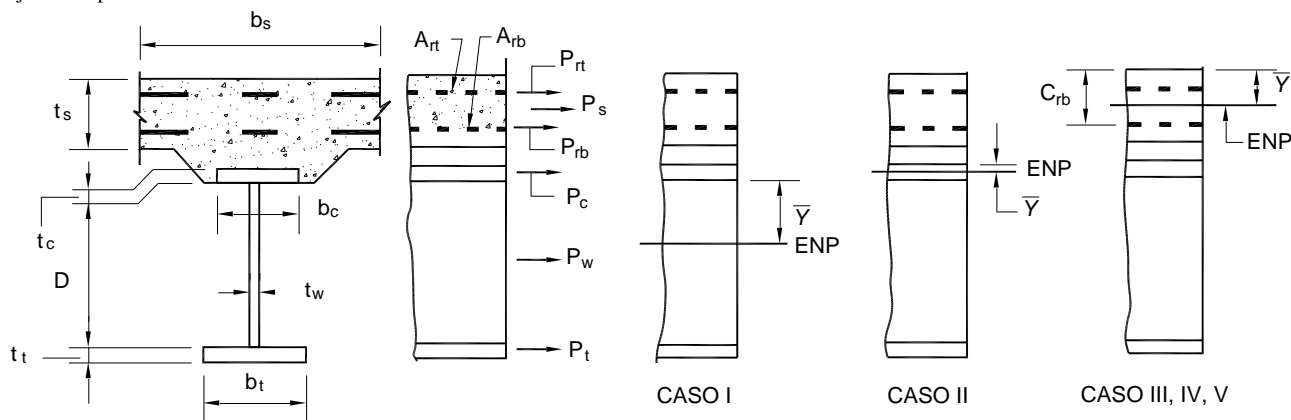
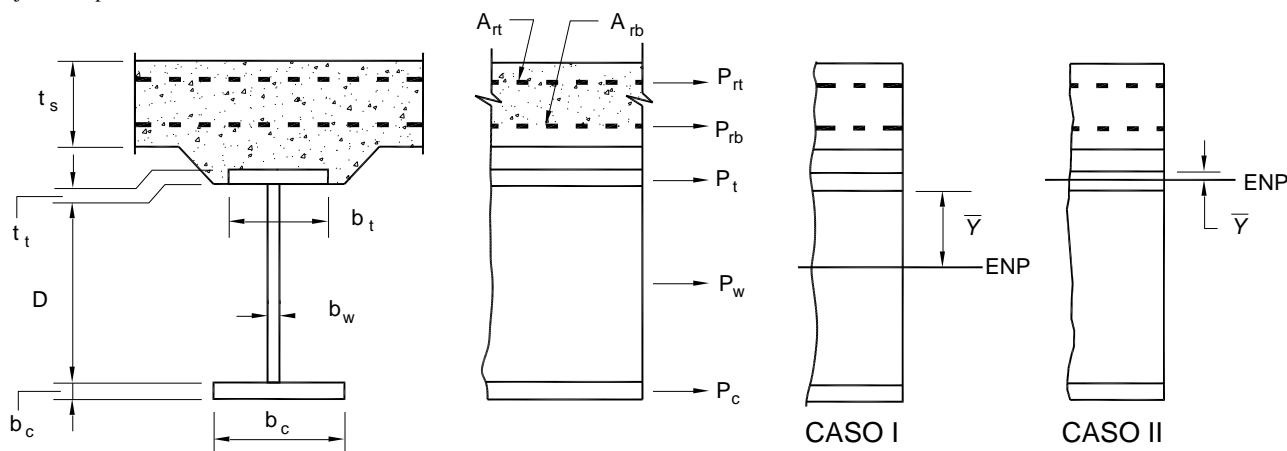
[§] ENP = Eje neutro plástico

Tabla D6.1-2 Cálculo de \bar{Y} y M_p para secciones en flexión negativa.

| CASO | ENP [§] | CONDICIÓN | \bar{Y} , M_p |
|------|--------------------|--|---|
| I | En el alma | $P_c + P_w \geq P_t + P_{rb} + P_{rt}$ | $\bar{Y} = \left(\frac{D}{2} \right) \left[\frac{P_c - P_t - P_{rt} - P_{rb}}{P_w} + 1 \right]$ $M_p = \frac{P_w}{2D} \left[\bar{Y}^2 + (D - \bar{Y})^2 \right] + [P_{rt}d_{rt} + P_{rb}d_{rb} + P_t d_t + P_c d_c]$ |
| II | En el ala superior | $P_c + P_w + P_t \geq P_{rb} + P_{rt}$ | $\bar{Y} = \left(\frac{t_t}{2} \right) \left[\frac{P_w + P_c - P_{rt} - P_{rb}}{P_t} + 1 \right]$ $M_p = \frac{P_t}{2t_t} \left[\bar{Y}^2 + (t_t - \bar{Y})^2 \right] + [P_{rt}d_{rt} + P_{rb}d_{rb} + P_w d_w + P_c d_c]$ |

[§] ENP = Eje neutro plástico

donde:

$$P_{rt} = F_{yt} A_{rt}$$

$$P_s = 0.85 f'_c b_s t_s$$

$$P_{rb} = F_{yrb} A_{rb}$$

$$P_c = F_{yc} b_c t_c$$

$$P_w = F_{yw} D t_w$$

$$P_t = F_{yt} b_t t_t$$

D6.2 MOMENTO DE FLUENCIA

D6.2.1 Secciones no compuestas

El momento de fluencia, M_y , de una sección no compuesta se deberá tomar como el menor valor entre el momento requerido para provocar la primera fluencia nominal en el ala de compresión, M_{yc} , y el momento requerido para provocar la primera fluencia nominal en el ala de tracción, M_{yt} , en el Estado Límite de Resistencia. En este cálculo se deberá despreciar la flexión lateral de las alas independientemente del tipo de sección, mientras que en las secciones híbridas se deberá despreciar la fluencia del alma.

D6.2.2 Secciones compuestas en flexión positiva

El momento de fluencia de una sección compuesta en flexión positiva se deberá tomar como la sumatoria de los momentos aplicados separadamente al acero y a las secciones compuestas a corto y largo plazo para provocar la primera fluencia nominal en cualquiera de las alas de acero en el Estado Límite de Resistencia. En este cálculo se deberá despreciar la flexión lateral de las alas independientemente del tipo de sección, mientras que en las secciones híbridas se deberá despreciar la fluencia del alma.

El momento de fluencia de una sección compuesta en flexión positiva se puede determinar de la siguiente manera:

- Calcular el momento M_{D1} provocado por la carga permanente mayorada aplicada antes que el tablero de hormigón se haya endurecido o vuelto compuesto. Aplicar este momento a la sección de acero.
- Calcular el momento M_{D2} provocado por el resto de la carga permanente mayorada. Aplicar este momento a la sección compuesta a largo plazo.
- Calcular el momento adicional M_{AD} que se debe aplicar a la sección compuesta a corto plazo para provocar fluencia nominal en cualquiera de las alas de acero.
- El momento de fluencia la suma del momento debido a todas las cargas permanentes más el momento adicional.

Simbólicamente, el procedimiento se puede expresar de la siguiente manera:

1) Resolver para M_{AD} de la siguiente ecuación:

$$F_y = \frac{M_{D1}}{S_{NC}} + \frac{M_{D2}}{S_{LT}} + \frac{M_{AD}}{S_{ST}} \quad (D6.2.2-1)$$

2) Luego calcular:

$$M_y = M_{D1} + M_{D2} + M_{AD} \quad (D6.2.2-2)$$

donde:

S_{NC} = módulo resistente de la sección no compuesta (mm^3)

S_{ST} = módulo resistente de la sección compuesta a corto plazo (mm^3)

S_{LT} = módulo resistente de la sección compuesta a largo plazo (mm^3)

M_{D1}, M_{D2}, M_{AD} = momentos debidos a las cargas mayoradas aplicados a las secciones correspondientes (N-mm)

M_y se deberá tomar como el menor valor calculado para el ala de compresión, M_{yc} , o el ala de tracción, M_{yt} .

D6.2.3 Secciones compuestas en flexión negativa

Para las secciones compuestas en flexión negativa se deberá seguir el procedimiento especificado en el Artículo D6.2.2, excepto que la sección compuesta tanto para los momentos a corto plazo como para los momentos a largo plazo deberá consistir en la sección de acero y la armadura longitudinal dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón. Por lo tanto, S_{ST} y S_{LT} tienen el mismo valor. Además, M_{yt} se deberá tomar con respecto ya sea al ala de tracción o a la armadura longitudinal, cualquiera sea el que entre en fluencia primero.

D6.2.4 Secciones con cubrejuntas

Para las secciones que contienen cubrejuntas en las alas, M_{yc} o M_{yt} se deberá tomar como el menor valor de momento asociado con la primera fluencia nominal en base a la tensión ya sea en el ala considerada o en cualquiera de los cubrejuntas unidos a dicha ala, cualquiera sea el que entre en fluencia primero. En este cálculo se deberá despreciar la flexión lateral de las alas independientemente del tipo de sección, mientras que en las secciones híbridas se deberá despreciar la fluencia del alma.

D6.3 PROFUNDIDAD COMPRIMIDA DEL ALMA

D6.3.1 En el rango elástico (D_c)

Para las secciones compuestas en flexión positiva, la profundidad comprimida del alma en el rango elástico, D_c , será la profundidad en la cual la suma algebraica de las tensiones en el acero, la sección compuesta a largo plazo y la sección compuesta a corto plazo debidas a las cargas permanentes y sobrecargas más las cargas de impacto sea de compresión.

En lugar de calcular D_c en las secciones en flexión positiva en base a un diagrama de tensiones se pueden utilizar las siguiente ecuación:

$$D_c = \left[\frac{-f}{|f_c + f_t|} \right] d - t_{fc} \geq 0 \quad (D6.3.1-1)$$

CD6.3.1

En las secciones en flexión positiva el valor de D_c de la sección compuesta aumenta a medida que aumenta la longitud de tramo debido a que aumenta la relación entre la carga permanente y la sobrecarga viva. Por lo tanto, en general es importante reconocer el efecto de la tensión debida a la carga permanente sobre la posición del eje neutro de la sección compuesta en las regiones de flexión positiva.

De acuerdo con estas Especificaciones, para las secciones compuestas en flexión positiva solamente es necesario usar la Ecuación 1 para verificar el pandeo flexional del alma en el Estado Límite de Servicio y para calcular el factor R_b en el Estado Límite de Resistencia para secciones en las cuales de acuerdo con el Artículo 6.10.2.1.1 se requieren rigidizadores de alma longitudinales. Nunca se requiere la Ecuación 1 para secciones compuestas en flexión positiva cuando el alma satisface los requisitos del Artículo 6.10.2.1.1 de modo que

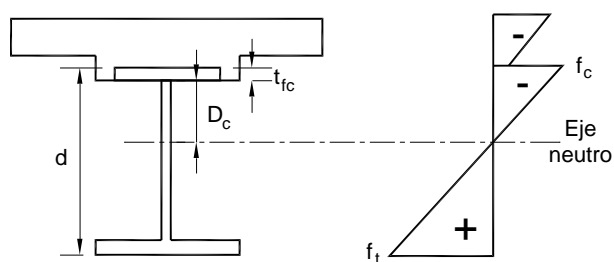


Figura D6.3.1-1 Cálculo de D_c en secciones en flexión positiva.

donde:

d = profundidad de la sección de acero (mm)

f_c = sumatoria de las diferentes tensiones de flexión en el ala de compresión provocadas por las diferentes cargas, es decir, DC1 (la carga permanente que actúa sobre la sección no compuesta), DC2 (la carga permanente que actúa sobre la sección compuesta a largo plazo), DW (la carga correspondiente a la superficie de rodamiento), y LL+IM; actuando sobre sus respectivas secciones (MPa). El valor de f_c se deberá considerar negativo cuando la tensión sea de compresión. En este cálculo se deberá despreciar la flexión lateral de las alas.

f_t = sumatoria de las diferentes tensiones en el ala de tracción provocadas por las diferentes cargas (MPa). En este cálculo se deberá despreciar la flexión lateral de las alas.

Para las secciones compuestas en flexión negativa D_c se deberá calcular para la sección compuesta por la viga de acero más la armadura longitudinal, con la siguiente salvedad. Para las secciones compuestas en flexión negativa en estado límite de servicio en las cuales el tablero de hormigón se considera efectivo en tracción para el cálculo de las tensiones de flexión en la sección compuesta debidas a la combinación de cargas correspondiente a Estado Límite de Servicio II, D_c se deberá calcular usando la Ecuación 1.

D6.3.2 Cuando se produce el momento plástico (D_{cp})

Para las secciones compuestas en flexión positiva, la profundidad comprimida del alma cuando se produce el momento plástico, D_{cp} , se deberá tomar de la siguiente manera para los casos de la Tabla D6.1-1 en que el eje neutro plástico se encuentra en el alma:

no se requieren rigidizadores longitudinales. Los Artículos C6.10.1.9.2, C6.10.1.10.2 y C6.10.4.2.2 discuten la justificación de estos cálculos, que introducen una dependencia de la resistencia a la flexión respecto de la carga aplicada cuando $R_b < 1$, y por lo tanto potencialmente complican los cálculos posteriores para este tipo de secciones. El Artículo C6.10.1.9.1 explica por qué no es necesario calcular D_c para secciones compuestas en flexión positiva cuando el alma satisface el Artículo 6.10.2.1.1.

Para las secciones compuestas en flexión negativa, típicamente el tablero de hormigón no se considera efectivo en tracción. Por lo tanto, en este caso la distancia entre las ubicaciones del eje neutro para las secciones de acero y compuestas es pequeña, y la ubicación del eje neutro para la sección compuesta prácticamente no es afectada por la tensión debida a la carga permanente. Por lo tanto, para la mayoría de las situaciones estas Especificaciones especifican el uso de D_c calculado simplemente para la sección formada por la sección de acero más la armadura longitudinal, sin considerar la suma algebraica de las tensiones que actúan sobre las secciones no compuesta y compuesta. Esto elimina potenciales dificultades en la posterior determinación de las cargas admisibles ya que el D_c resultante es independiente de las cargas aplicadas y por lo tanto la resistencia a la flexión en flexión negativa (la cual depende de D_c) no depende de la carga aplicada. La única excepción es que si en el Estado Límite de Servicio el tablero de hormigón se considera efectivo en tracción en las regiones de flexión negativa, tal como se permite para las secciones compuestas que satisfacen los requisitos especificados en el Artículo 6.10.4.2.1, para calcular D_c se debe utilizar la Ecuación 1. Para este caso, en la Figura 1 se deberían intercambiar las tensiones f_c y f_t , se deberían invertir los signos que aparecen en el diagrama de tensiones, t_{fc} debería ser el espesor del ala inferior, y D_c se debería medir desde el eje neutro hacia abajo, en dirección a la parte superior del ala inferior.

$$D_{cp} = \frac{D}{2} \left[\frac{F_{yt} A_t - F_{yc} A_c - 0.85 f'_c A_s - F_{yrs} A_{rs}}{F_{yw} A_w} + 1 \right] \quad (D6.3.2-1)$$

donde:

A_c = área del ala de compresión (mm²)

A_{rs} = área total de la armadura longitudinal dentro del ancho efectivo del tablero de hormigón (mm²)

A_s = área del tablero de hormigón (mm²)

A_t = área del ala de tracción (mm²)

A_w = área del alma (mm²)

D_{cp} = profundidad del alma comprimida cuando se produce el momento plástico (mm)

F_{yrs} = mínima resistencia a la fluencia especificada de la armadura longitudinal (MPa)

Para todas las demás secciones compuestas en flexión positiva D_{cp} se deberá tomar igual a cero.

Para las secciones compuestas en flexión negativa D_{cp} se deberá tomar de la siguiente manera para los casos de la Tabla D6.1-2 en que el eje neutro plástico se encuentra en el alma:

$$D_{cp} = \frac{D}{2A_w F_{yw}} \left[F_{yt} A_t + F_{yw} A_w + F_{yrs} A_{rs} + F_{yc} A_c \right] \quad (D6.3.2-2)$$

Para todas las demás secciones compuestas en flexión negativa D_{cp} se deberá tomar igual a D .

Para las secciones no compuestas en las cuales:

$$F_{yw} A_w \geq |F_{yc} A_c - F_{yt} A_t| \quad (D6.3.2-3)$$

D_{cp} se deberá tomar como:

$$D_{cp} = \frac{D}{2A_w F_{yw}} \left[F_{yt} A_t + F_{yw} A_w - F_{yc} A_c \right] \quad (D6.3.2-4)$$

Para todas las demás secciones no compuestas D_{cp} se deberá tomar igual a D .

D6.4 ECUACIONES DE PANDEO LATERAL TORSIONAL PARA $C_b > 1.0$, CON ÉNFASIS EN LOS REQUISITOS SOBRE LONGITUD NO ARRIOSTRADA PARA DESARROLLO DE LA MÁXIMA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

D6.4.1 Según los requisitos del Artículo 6.10.8.2.3

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento es prismático, la resistencia al pandeo lateral torsional del ala de compresión se deberá tomar como:

- Si $L_b \leq L_p$, entonces:

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (D6.4.1-1)$$

- Si $L_p < L_b \leq L_r$, entonces:

$$\circ \text{ Si } L_b \leq L_p + \frac{\left(1 - \frac{1}{C_b}\right)}{\left(1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}}\right)} (L_r - L_p), \text{ entonces:}$$

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (D6.4.1-2)$$

- Caso contrario:

$$F_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr}}{R_h F_{yc}} \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] R_b R_h F_{yc} \leq R_b R_h F_{yc} \quad (D6.4.1-3)$$

- Si $L_b > L_r$, entonces:

$$\circ \text{ Si } L_b \leq \pi r_t \sqrt{\frac{C_b E}{R_h F_{yc}}}, \text{ entonces:}$$

$$F_{nc} = R_b R_h F_{yc} \quad (D6.4.1-4)$$

- Caso contrario:

$$F_{nc} = F_{cr} \leq R_b R_h F_{yc} \quad (D6.4.1-5)$$

Todos los términos de las ecuaciones anteriores se deberán tomar como se definen en el Artículo 6.10.8.2.3.

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento no es prismático, la resistencia al pandeo lateral torsional

CD6.4.1

Para valores del modificador del gradiente de momentos C_b mayores que 1.0, es posible que en longitudes no arriostradas más largas se alcance la máxima resistencia al pandeo lateral torsional F_{max} ilustrada en la Figura C6.10.8.2.1-1. Los requisitos de este artículo son equivalentes a los del Artículo 6.10.8.2.3, pero permiten que el Ingeniero se concentre en las condiciones para las cuales la resistencia al pandeo lateral torsional es igual a $F_{max} = R_{pc} F_{yc}$ cuando al determinar los límites para L_b se incluyen los efectos del gradiente de momentos.

La mayor longitud no arriostrada para la cual la resistencia al pandeo lateral torsional del Artículo 6.10.8.2.3 es igual a la resistencia al pandeo local del ala del Artículo 6.10.8.2.2 se puede determinar sustituyendo $F_{nc(FLB)}/R_b$ por $R_h F_{yc}$ al verificar el requisito referente a L_b para el uso de la Ecuación 2 o 4 según corresponda, siendo $F_{nc(FLB)}$ la resistencia al pandeo local del ala obtenida del Artículo 6.10.8.2.2.

Si en la Ecuación 6.10.8.2.3-9 $D_c t_w / b_{fc} t_{fc}$ se toma igual a un valor representativo de 2.0, F_{yc} se toma como 345 MPa y $F_{yw} > 0.7 F_{yc}$, la resistencia al pandeo lateral torsional del Artículo 6.10.8.2.3 es igual a F_{max} para $L_b < 22 b_{fc}$ cuando $C_b > 1.75$ y $L_b < 17 b_{fc}$ para $C_b > 1.3$. El Ingeniero debe observar que, incluso con valores de C_b relativamente pequeños, los requisitos sobre longitud no arriostrada para lograr una resistencia flexional igual a F_{max} son significativamente mayores que los asociados con flexión uniforme respecto del eje mayor y $C_b = 1$. El Artículo C6.10.8.2.3 discute cómo calcular correctamente $C_b > 1$ para el diseño de puentes.

del ala de compresión se deberá tomar como la menor resistencia dentro de la longitud no arriostrada considerada, determinada a partir de la ecuación anterior aplicable suponiendo que la longitud no arriostrada es prismática. Para longitudes no arriostradas que contienen una transición hacia una sección de menor tamaño a una distancia menor o igual que 20 por ciento de la longitud arriostrada a partir del punto de arriostramiento que tiene el menor momento, la resistencia al pandeo lateral torsional se puede determinar asumiendo que la transición hacia la sección de menor tamaño no existe.

D6.4.2 Según los requisitos del Artículo A6.3.3

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento es prismático, la resistencia a la flexión basada en el pandeo lateral torsional se deberá tomar como:

- Si $L_b \leq L_p$, entonces:

$$M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (D6.4.2-1)$$

- Si $L_p < L_b \leq L_r$, entonces:

$$\circ \text{ Si } L_b \leq L_p + \frac{\left(1 - \frac{1}{C_b}\right)}{\left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}}\right)} (L_r - L_p), \text{ entonces:}$$

$$M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (D6.4.2-2)$$

- Caso contrario:

$$M_{nc} = C_b \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} S_{xc}}{R_{pc} M_{yc}} \right) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] R_{pc} M_{yc} \leq R_{pc} M_{yc} \quad (D6.4.2-3)$$

- Si $L_b > L_r$, entonces:

- Si

$$L_b \leq 1.95 r_t \frac{C_b S_{xc} E}{R_{pc} M_{yc}} \sqrt{\frac{J}{S_{xc} h}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left(\frac{R_{pc} M_{yc}}{C_b S_{xc} E} \frac{S_{xc} h}{J} \right)^2}}$$

entonces:

$$M_{nc} = R_{pc} M_{yc} \quad (D6.4.2-4)$$

- Caso contrario:

CD6.4.2

Para valores del modificador del gradiente de momentos C_b mayores que 1.0, es posible que en longitudes no arriostradas más largas se alcance la máxima resistencia al pandeo lateral torsional M_{max} ilustrada en la Figura C6.10.8.2.1-1. Los requisitos de este artículo son equivalentes a los del Artículo A6.3.3, pero permiten que el Ingeniero se concentre en las condiciones para las cuales la resistencia al pandeo lateral torsional es igual a $M_{max} = R_{pc} M_{yc}$ cuando al determinar los límites para L_b se incluyen los efectos del gradiente de momentos.

La mayor longitud no arriostrada para la cual la resistencia al pandeo lateral torsional del Artículo A6.3.3 es igual a la resistencia al pandeo local del ala del Artículo A6.3.2 se puede determinar sustituyendo $M_{nc(FLB)}$ por $R_{pc} M_{yc}$ al verificar el requisito referente a L_b para el uso de la Ecuación 2 o 4 según corresponda, siendo $M_{nc(FLB)}$ la resistencia al pandeo local del ala obtenida del Artículo A6.3.2.

Típicamente el Artículo A6.3.3 requiere valores similares o algo inferiores que el Artículo 6.10.8.2.3 para los límites sobre L_b requeridos para llegar a una resistencia del elemento $M_{max} > R_h M_{yc}$, dependiendo de la magnitud de R_{pc} . Si en la Ecuación A6.3.3-10 $D_{ctw}/b_{fc} t_{fc}$ se toma igual a un valor representativo de 2.0, F_{yc} se toma como 345 MPa y $F_{yw} > 0.7 F_{yc}$, entonces para $R_{pc} = 1.12$ la resistencia al pandeo lateral torsional de este artículo es típicamente igual a M_{max} cuando $L_b < 22 b_{fc}$ para $C_b > 1.75$ y cuando $L_b < 15 b_{fc}$ para $C_b > 1.30$. Para $R_{pc} = 1.30$ y usando las hipótesis arriba indicadas, las ecuaciones de resistencia al pandeo lateral torsional llegan a M_{max} cuando $L_b < 20 b_{fc}$ para $C_b > 1.75$ y cuando $L_b < 13 b_{fc}$ para $C_b > 1.30$. El Ingeniero debe observar que, incluso con valores de C_b relativamente pequeños, los requisitos sobre longitud no arriostrada para lograr una resistencia flexional igual a M_{max} son significativamente mayores que los asociados con flexión uniforme respecto del eje mayor y $C_b = 1$. El Artículo C6.10.8.2.3 discute cómo calcular correctamente $C_b > 1$ para el diseño de puentes.

$$M_{nc} = F_{cr} S_{xc} \leq R_{pc} M_{yc} \quad (\text{D6.4.2-5})$$

Todos los términos de las ecuaciones anteriores se deberán tomar como se definen en el Artículo A6.3.3.

Para longitudes no arriostradas en las cuales el elemento no es prismático, la resistencia a la flexión basada en el pandeo lateral torsional se deberá tomar como la menor resistencia dentro de la longitud no arriostrada considerada determinada a partir de la ecuación anterior aplicable suponiendo que la longitud no arriostrada es prismática. Para longitudes no arriostradas que contienen una transición hacia una sección de menor tamaño a una distancia menor o igual que 20 por ciento de la longitud arriostrada a partir del punto de arriostramiento que tiene el menor momento, la resistencia a la flexión basada en el pandeo lateral torsional se puede determinar asumiendo que la transición hacia la sección de menor tamaño no existe.

D6.5 CARGAS CONCENTRADAS APLICADAS A ALMAS SIN RIGIDIZADORES DE APOYO

D6.5.1 Disposiciones generales

En los apoyos y otras ubicaciones sujetas a cargas concentradas, cuando las cargas no son transmitidas a través de un tablero o sistema de tablero, las almas sin rigidizadores de apoyo se deberán investigar para los estados límites correspondientes a fluencia local del alma y abolladura del alma de acuerdo con los requisitos de los Artículos D6.5.2 y D6.5.3.

D6.5.2 Fluencia local de las almas

Las almas sujetas a cargas concentradas de compresión o

CD6.5.1

Las ecuaciones de este artículo son básicamente idénticas a las ecuaciones dadas en AISC (1999). No se incluye el estado límite de pandeo lateral del alma dado en AISC (1999) ya que éste solo resulta determinante para los elementos sujetos a cargas concentradas aplicadas directamente a la sección de acero, y para los elementos para los cuales el ala de compresión está arriostrada en el punto de carga, el ala de tracción no está arriostrada en este punto y la relación entre D/t_w y L_b/b_{fi} es mayor que 1.7. En general, estas condiciones no ocurren en la construcción de puentes.

Las secciones armadas y los perfiles laminados sin rigidizadores de apoyo en las ubicaciones indicadas se deberían modificar de manera que satisfagan estos requisitos, o bien en la ubicación considerada se deberían colocar rigidizadores de apoyo diseñados de acuerdo con los requisitos del Artículo 6.10.11.2.

Para aquellos raros casos en los cuales hay cargas concentradas diametralmente opuestas aplicadas directamente al alma de la sección de acero a nivel de cada una de las alas, como por ejemplo si hay una fuerza concentrada directamente sobre un punto de reacción en una ubicación no rigidizada a lo largo de la longitud de una viga, se deberían considerar los requisitos de AISC (1999) referentes al uso de rigidizadores adicionales para fuerzas concentradas.

CD6.5.2

La intención de este estado límite es evitar la fluencia

tracción deberán satisfacer:

$$R_u \leq \phi_b R_n \quad (\text{D6.5.2-1})$$

donde:

R_n = resistencia nominal a la carga concentrada (N)

- Para las reacciones de las pilas interiores y para las cargas concentradas aplicadas a una distancia mayor que d a partir del extremo del elemento:

$$R_n = (5k + N) F_{yw} t_w \quad (\text{D6.5.2-2})$$

- Caso contrario:

$$R_n = (2.5k + N) F_{yw} t_w \quad (\text{D6.5.2-3})$$

donde:

ϕ_b = factor de resistencia para aplastamiento especificado en el Artículo 6.5.4.2

d = profundidad de la sección de acero (mm)

k = distancia desde la cara exterior del ala que resiste la carga concentrada o reacción de apoyo hasta el talón del chaflán del alma (mm)

N = longitud de aplastamiento (mm). En los apoyos extremos N deberá ser mayor o igual que k .

R_u = carga concentrada o reacción de apoyo mayorada (N)

D6.5.3 Abolladura del alma

Las almas sujetas a cargas concentradas de compresión deberán satisfacer:

$$R_u \leq \phi_w R_n \quad (\text{D6.5.3-1})$$

donde:

R_n = resistencia nominal a la carga concentrada (N)

- Para las reacciones de las pilas interiores y para las cargas concentradas aplicadas a una distancia mayor que $d/2$ del extremo del elemento:

localizada del alma como consecuencia de una elevada tensión de compresión o tracción provocada por una carga concentrada o reacción de apoyo.

Se supone que una carga concentrada que actúa sobre un perfil laminado o una sección armada es crítica en el pie del filete ubicado a una distancia k de la cara exterior del ala que resiste la carga concentrada o reacción de apoyo, según corresponda. Para los perfiles laminados, los valores de k se pueden obtener de las tablas de dimensiones publicadas. Para las secciones armadas, k se puede tomar como la distancia entre la cara exterior del ala hasta el pie de la soldadura entre el alma y el ala.

En la Ecuación 2 para cargas interiores o reacciones en pilas interiores, se supone que la carga se distribuye sobre el alma con una pendiente de 2.5 en 1 y en una distancia igual a $(5k + N)$. Una carga concentrada interior se define como una carga aplicada a una distancia del extremo del elemento que es mayor que la profundidad de la sección de acero. En la Ecuación 3 para cargas o reacciones en los extremos, se asume que la carga se distribuye sobre el alma con la misma pendiente en una distancia igual a $(2.5k + N)$. Estos criterios se basan en gran medida en los trabajos de Johnston y Kubo (1941) y Graham et al. (1959).

CD6.5.3

La intención de este estado límite es evitar la inestabilidad local o abolladura del alma como consecuencia de una elevada tensión de compresión o tracción provocada por una carga concentrada o reacción de apoyo.

Las Ecuaciones 2 y 3 se basan en investigaciones realizadas por Roberts (1981). La Ecuación 4 para $N/d > 0.2$ fue desarrollada por Elgaaly (1991) luego de llevar a cabo ensayos adicionales para lograr una mejor representación de las mayores longitudes de apoyo que hay en los extremos de los elementos.

$$R_n = 0.8 t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{EF_{yw} t_f}{t_w}} \quad (\text{D6.5.3-2})$$

- Caso contrario:

- Si $N/d \leq 0.2$, entonces:

$$R_n = 0.4 t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{EF_{yw} t_f}{t_w}} \quad (\text{D6.5.3-3})$$

- Si $N/d > 0.2$, entonces:

$$R_n = 0.4 t_w^2 \left[1 + \left(\frac{4N}{d} - 0.2 \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{EF_{yw} t_f}{t_w}} \quad (\text{D6.5.3-4})$$

donde:

ϕ_w = factor de resistencia para abolladura del alma especificado en el Artículo 6.5.4.2

t_f = espesor del ala que resiste la carga concentrada o reacción de apoyo (mm)