

INTI
Instituto Nacional
de Tecnología Industrial

Recomendación CIRSOC 302-1



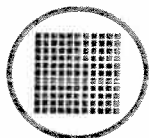
Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales
de Seguridad para las Obras Civiles del Sistema INTI

Métodos de Cálculo para los Problemas de Estabilidad del Equilibrio en las Estructuras de Acero

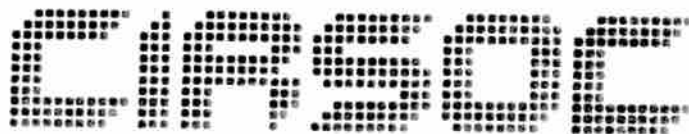
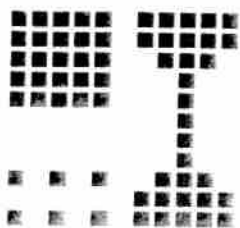
Julio 1982

SIREA

Esta Publicación integra el
Sistema Reglamentario Argentino
para las Obras Civiles

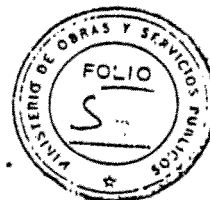


INTI
Instituto Nacional
de Tecnología Industrial



Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales
de Seguridad para las Obras Civiles del Sistema INTI

RESOLUCIONES:
MOySP N° 977/83
MOySP N° 621/84
SSOP N° 59/90
SSOP N° 3/91



Expte. n° 40109/83.

Ministerio de Obras y Servicios Públicos

BUENOS AIRES, 7 OCT 1983

VISTO la necesidad de contar con un cuerpo orgánico y actualizado de normas en materia de seguridad estructural en las construcciones, y

CONSIDERANDO:

Que para atender a esa necesidad, la ex-Secretaría de Estado de Transporte y Obras Públicas dispuso oportunamente, en coordinación con otros organismos estatales, la creación del CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES (CIRSOC).

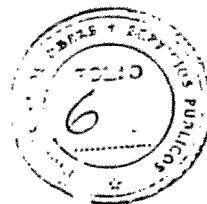
Que el citado organismo ha dado fin a una de las etapas de su cometido mediante la elaboración y publicación de los Reglamentos, Recomendaciones y Disposiciones que más adelante se detallarán.

Que la adopción de ese cuerpo normativo no sólo ha de significar una mayor seguridad en las construcciones sino también una más beneficiosa racionalización en el empleo de materiales y técnicas por parte de proyectistas y constructores.

Que asimismo se tenderá a un mejor ordenamiento en la actividad experimental y de investigación que desarrollan los institutos y laboratorios especializados.

Que es conveniente propender a que se extienda a todo el ámbito nacional la vigencia de las normas elaboradas por el CIRSOC, en procura del beneficio adicional representado por la

11
44. 2



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

coherencia y uniformidad de las reglamentaciones, objetivo por el que se viene bregando en nuestro país desde hace mucho tiempo.

Que de acuerdo con lo establecido en el Artículo 22 apartado 19 de la Ley N° 22.520 nada obsta para proceder a la aprobación de los documentos elaborados por el CIRSOC.

Por ello,

EL MINISTRO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS

RESUELVE:

ARTICULO 1° - Apruébanse los siguientes REGLAMENTOS, RECOMENDACIONES y DISPOSICIONES elaborados por el CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES (CIRSOC), que integran la presente como ANEXOS n° 1 al 17, cuyos títulos se indican a continuación:

REGLAMENTOS

- 101: Cargas y sobrecargas gravitatorias para el cálculo de las estructuras de edificios.
- 102: Acción del viento sobre las construcciones.
- 104: Acción de la nieve y del hielo sobre las construcciones.
- 201: Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de Hormigón Armado y Pretensado.
- 301: Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios.
- 302: Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero.

[Firma manuscrita]



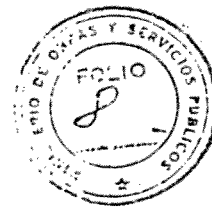
Ministerio de Obras y Servicios Públicos

RECOMENDACIONES

- 102-1: Acción dinámica del viento sobre las construcciones.
- 105: Superposición de acciones. Combinaciones de estados de carga.
- 106: Dimensionamiento del coeficiente de seguridad.
- 107: Acción térmica climática sobre las construcciones.
- 201-1: Acero para hormigón armado con $B_S = 500 \text{ MN/m}^2$ y $B_S = 600 \text{ MN/m}$.
- 301-2: Métodos simplificados admitidos para el cálculo de las estructuras metálicas.
- 302-1: Métodos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero.
- 303: Estructuras livianas de acero.

DISPOSICIONES

- 251: Acero para estructuras de hormigón armado. Métodos de ensayo y condición de aceptación.
 - 252: Agregados para hormigones. Métodos de ensayo.
 - 256: Ensayo de penetración de agua en el hormigón endurecido.
- ARTICULO 2º - Los REGLAMENTOS, RECOMENDACIONES y DISPOSICIONES indicados en el Artículo 1º serán de aplicación obligatoria en todas las obras públicas nacionales a partir del día 1º de noviembre de 1983.
- ARTICULO 3º - Durante el lapso de DOS (2) años a partir de la fecha indicada en el artículo anterior, los organismos responsables de la ejecución de obras públicas nacionales podrán proponer las modificaciones que consideren aconsejable introducir en



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

el cuerpo normativo objeto de esta resolución, como consecuencia de las experiencias observadas durante su aplicación práctica.

ARTICULO 4° - Las propuestas de modificaciones a que se refiere el artículo anterior deberán ser presentadas ante este Ministerio a través de la Secretaría de Obras Públicas, la que las pondrá en conocimiento del CIRSOC para su consideración.

ARTICULO 5° - Regístrese, comuníquese, publíquese y archívese.

RESOLUCION N° 977/83 MOySP

CONRADO BAUER
MINISTRO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS

RESOLUCION MOYSP N° 621/84



Expediente n° 25327/84.



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

BUENOS AIRES, 31 JUL 1984

VISTO que por Decreto N° 1393 del 7 de mayo de 1984, se delegó en el Ministerio de Obras y Servicios Públicos la facultad de aprobar los Reglamentos, Recomendaciones y Disposiciones vinculadas con la seguridad de las Obras Civiles, y

CONSIDERANDO:

Que en virtud de lo dispuesto por el Artículo 1° del aludido decreto, corresponde ratificar la Resolución N° 977-MOySP. del 7 de octubre de 1983 para dar continuidad y congruencia a la tarea iniciada.

Por ello,

EL MINISTRO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS

RESUELVE:

ARTICULO 1° - Ratifícase la Resolución N° 977-MOySP. del 7 de octubre de 1983.

ARTICULO 2° - La Resolución N° 977-MOySP. del 7 de octubre de 1983 será de aplicación obligatoria en todas las obras públicas nacionales, que realicen los entes centralizados y descentralizados autárquicamente, las Empresas del Estado, las Sociedades del Estado, las Sociedades de Economía Mixta y las Sociedades Anónimas con participación mayoritaria Estatal, a partir del 1° de agosto de 1984.

A. R. S.



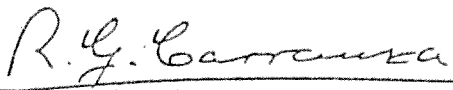
Ministerio de Obras y Servicios Públicos

ARTICULO 3° - Los organismos responsables de la ejecución de obras públicas nacionales podrán proponer las modificaciones que consideren aconsejables introducir en el cuerpo normativo objeto de esta resolución, como consecuencia de las experiencias observadas durante su aplicación práctica. Estas propuestas deberán ser presentadas ante este Ministerio a través de la Subsecretaría de Obras y Servicios Públicos para su consideración.

ARTICULO 4° - Invitar a las provincias a adoptar las normas cuya ratificación se efectúa por el Artículo 1°.

ARTICULO 5° - Regístrese, comuníquese, publíquese y archívese.

RESOLUCION N° 621/84 MOySP


ING. ROQUE GUILLERMO CARRANZA
MINISTRO DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS

11



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

BUENOS AIRES, 19 NOV 1990

VISTO las Resoluciones SOP Nros. 55/87 y 69/87, los actuados del Expediente SOP N°40.093/90 y

CONSIDERANDO:

Que deben establecerse mayores precisiones en lo que hace a la definición y objetivos del Sistema Reglamentario Argentino para las obras civiles encaradas por el Gobierno Nacional (SIREA), creado por Resolución SOP N° 55/87, y en lo relacionado con los documentos y publicaciones que lo integran.-

Que la introducción del SIREA ha producido en los ámbitos de su aplicación confusiones conceptuales y operativas que resulta oportuno corregir y aclarar.-

Que la experiencia ha demostrado la conveniencia de restituir al Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) la facultad del manejo de los aspectos relacionados con la edición y distribución de la normativa técnica que elabora, la que le había sido quitada por el Art. 6° de la Resolución SOP N° 55/87.-

Que efectuada una consulta pública del anteproyecto de la presente Resolución entre instituciones académicas, técnicas



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

y profesionales, así como también Empresas y Organismos del Estado, la misma ha resultado ampliamente favorable.-

Que en virtud de lo establecido en la Resolución MOYSP N°603/90 del 27 de setiembre de 1990 han sido delegadas en la Subsecretaría de Obras Públicas las facultades de aprobar los Reglamentos, Recomendaciones y Disposiciones que elabore el CIRSOC.-

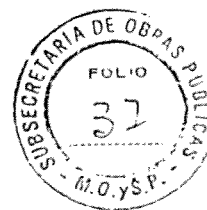
Por ello,

EL SUBSECRETARIO DE OBRAS PUBLICAS

RESUELVE:

ARTICULO 1°.- El Sistema Reglamentario Argentino para las Obras Civiles (SIREA) creado por Resolución SOP N°. 55/87, se regirá por las disposiciones de la presente Resolución.-

ARTICULO 2°.- El SIREA es el marco conceptual dentro del cual se inscribe la normativa técnica, que ordenadamente relacionada entre sí está vinculada con las obras civiles encaradas por el Gobierno Nacional en todas sus etapas de planificación, proyecto, cálculo, ejecución, uso, mantenimiento, modificación, reparación y demolición. Entiéndase por obras civiles las partes de una construcción que hacen a su resistencia, estabilidad, durabilidad, funcionalidad y habitabilidad, así como todas aquellas que, de una u otra forma, inciden en ello.



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

ARTICULO 3°.- El objetivo del SIREA es procurar la máxima seguridad, confiabilidad y aptitud de servicio de las construcciones así como la disminución de sus costos, el aumento de su calidad y su durabilidad, posibilitando a su vez la incorporación de nuevas tecnologías y su adaptación a cada modalidad regional.-

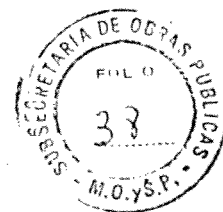
ARTICULO 4°.- La Subsecretaría de Obras Públicas dispondrá la incorporación al SIREA de todos aquellos documentos técnicos que considere apropiados, sean éstos publicados por ella misma o por otros organismos públicos o privados con competencia en los temas mencionados precedentemente.-

ARTICULO 5°.- Todos los documentos que la Subsecretaría de Obras Públicas publique e incorpore al SIREA incluirán en su cubierta, de la forma indicada en el Anexo I, la expresión "SIREA - Esta publicación integra el Sistema Reglamentario Argentino para las Obras Civiles".-

ARTICULO 6°.- La Subsecretaría de Obras Públicas deberá convenir con los organismos mencionados en el Art. 4°, para que los documentos que estos publiquen y ésta decida incorporar al SIREA, incluyan también en su cubierta la expresión mencionada precedentemente en la forma indicada en el Anexo I, así como la copia de la Resolución por la cual se los incorpora al Sistema y el listado completo de los documentos que integran el SIREA a la fecha de la publicación.

ARTICULO 7°.- El Centro de Estudios Tecnológicos para la Obra Pública CETOP, creado por Resolución SGP N° 17/88 entenderá

[Firma manuscrita]
[Iniciales]



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

en la planificación de las tareas de mejoramiento y actualización del SIREA, estableciendo las prioridades y necesidades para un desarrollo armónico y natural del cuerpo reglamentario.-

ARTICULO 8°.- Créase en el ámbito de la Subsecretaría de Obras Públicas, con sede en el Centro de Estudios Tecnológicos para la Obra Pública (CETOP), una Comisión Mixta Asesora de Reglamentos y Normas (RENOR) formada por representantes "ad honorem" de los Organismos y Empresas del Estado, asociaciones empresarias, entidades profesionales e instituciones académicas interesadas en contribuir al mejoramiento y actualización de la documentación técnica que integra el SIREA.

ARTICULO 9°.- La RENOR tendrá un Comité Ejecutivo que estará integrado por el Director del CETOP o quien el designe como suplente, y por dos representantes de cada una de las siguientes instituciones, un titular y un suplente: Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM), Asociación de Ingenieros Estructurales (AIE), Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), Cámara Argentina de la Construcción (CAC) y Unión Argentina de la Construcción (UAC). La coordinación de la RENOR corresponderá al representante del Ministerio de Obras y Servicios Públicos.

ARTICULO 10°.- El Comité Ejecutivo de la RENOR tendrá a su cargo la planificación y programación de las tareas de mejoramiento y actualización del SIREA, la detección y evaluación



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

de documentos para la ampliación o renovación del Sistema, estableciendo las prioridades, criterios, necesidades y forma de financiamiento para un desarrollo armónico del cuerpo reglamentario. Luego de su estudio, propondrá a la Subsecretaría de Obras Públicas las inclusiones o remociones del SIREA.

ARTICULO 11°.- Para el caso de aquellos documentos normativos que no correspondan a la jurisdicción y competencia del CIRSOC (Reglamentos Nacionales de Seguridad) o del IRAM (Normas), el Comité Ejecutivo de la RENOR establecerá los criterios de funcionamiento propios y de las subcomisiones a crearse para la elaboración de los documentos normativos que se decida redactar en el ámbito del CETOP. Definirá las instituciones estatales y privadas, empresas y profesionales a quienes se deberá convocar para participar en la redacción de los mismos y los elevará para la aprobación de la Subsecretaría de Obras Públicas, para su posterior incorporación al SIREA. Asimismo, establecerá con la autoridad de aplicación los criterios para la edición, distribución y/o venta y difusión de los documentos elaborados.

ARTICULO 12°.- Restitúyese al CIRSOC la facultad de publicar los Reglamentos y demás documentos técnicos que elabore y cuenten con la aprobación de la Subsecretaría de Obras Públicas, la que le había sido retirada en virtud de lo dispuesto en el Art.6° de la Resolución SOP N° 55/87. El CIRSOC determinará la denominación a la que deberá ajustarse la normativa técnica actualmente vigente y la que elabore en el



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

futuro; asimismo, podrá efectuar la reimpresión de documentos anteriormente aprobados y que se encontraren agotados.

ARTICULO 13°.- Déjanse sin efecto los artículos 2° a 8° de la Resolución SOP N° 55/87, y la Resolución SOP N° 69/87.-

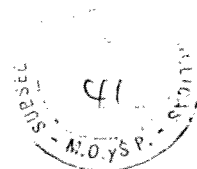
ARTICULO 14°.- Los documentos que integran el SIREA se ajustarán a los Requisitos Técnicos Mínimos que se detallan en el Anexo 2° de la presente. Observarán en general las prescripciones de la Norma IRAM 50, Partes I a IV, equivalente a la Guía ISO/IEC 2-1986 y en particular los Capítulos 3 "Documentos Normativos", 7 "Contenido de los Documentos Normativos" y 8 "Estructura de los Documentos Normativos".

ARTICULO 15°.- Regístrese, comuníquese y archívese.-

RESOLUCION SSOP N°: 59 /90

ING. MARIO JOSE GUARAGNA
SUBSECRETARIO DE OBRAS PUBLICAS DE LA NACION

MAJO



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

El fondo de la faja sera a tinta plena, del mismo color utilizado en la impresion de la tapa. El texto sera calado, resultando del color del papel utilizado en la confeccion de la tapa del documento.–

SIREA
Esta publicacion integra el
Sistema Reglamentario Argentino
para las obras civiles

Ancho = 12,5 cm

Alto = 3 cm

Distancia al
vertice = 3 cm

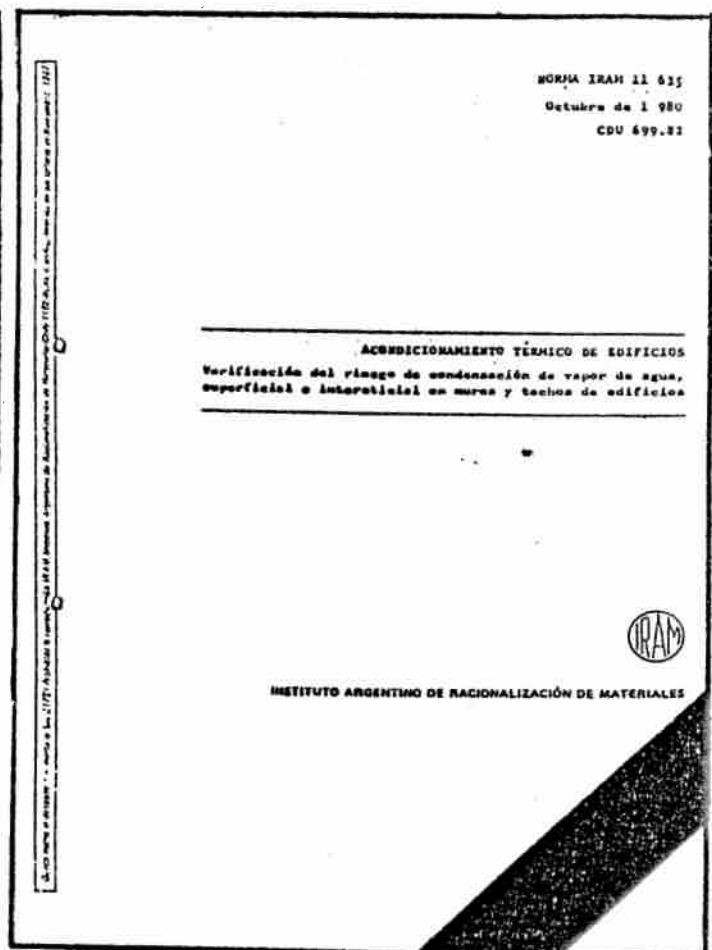
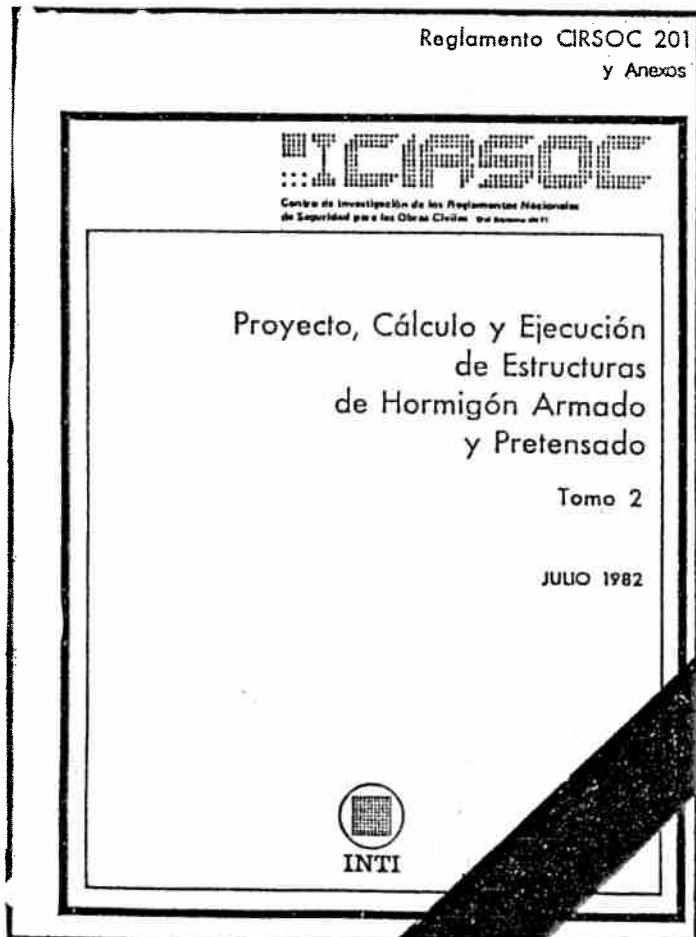
Luigi
Mto



Ministerio de Obras y Servicios Públicos



UBICACION DE LA FAJA IDENTIFICATORIA:



EN PUBLICACIONES DEL CIRSOC

EN PUBLICACIONES DE OTRO ORIGEN
INCORPORADAS AL SIREA (Ej. Normas
Iram, Normas Iram-IAS, Manuales, etc.)

Luigi
MTO



43

Ministerio de Obras y Servicios Públicos

ANEXO 2 - Res. SSOP No. 59 /90

REQUISITOS TECNICOS MINIMOS

A observar en la ejecución de Obras Civiles de caracter Público

1.- RESISTENCIA MECANICA Y ESTABILIDAD:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que las cargas a que puedan verse sometidas durante su construcción y utilización no produzcan ninguno de los siguientes resultados:

- 1.1.- Derrumbe de toda o parte de la obra.-
- 1.2.- Deformaciones importantes en grado inadmisible.-
- 1.3.- Deterioro de otras partes de la obra, de los accesorios o del equipo instalado, como consecuencia de una deformación importante de los elementos sustentantes.-
- 1.4.- Daño por accidente de consecuencias desproporcionadas respecto a la causa original.-

2.- SEGURIDAD EN CASO DE INCENDIO:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que, en caso de incendio:

- 2.1.- La capacidad de sustentación de la obra se mantenga durante un periodo de tiempo determinado.-
- 2.2.- La aparición y la propagación del fuego y del humo dentro de la obra esten limitados.-
- 2.3.- La propagación del fuego a obras vecinas este limitada.-

[Firma]
[Iniciales]



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

2.4.- Los ocupantes puedan abandonar la obra o ser rescatados por otros medios.-

2.5.- Se tenga en cuenta la seguridad de los equipos de rescate.-

3.- CONDICIONES DE HABITABILIDAD Y MEDIO AMBIENTE:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:

3.1.- Fugas de gas tóxico.-

3.2.- Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire.-

3.3.- Emisión de radiaciones peligrosas.-

3.4.- Contaminación o envenenamiento del agua o del suelo.-

3.5.- Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos.-

3.6.- Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.-

3.7.- Condiciones inaceptables de ventilación y confort térmico en los locales.-

4.- SEGURIDAD EN EL USO:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que su utilización o funcionamiento no supongan riesgos inadmisibles de accidentes como resbalones, caídas, colisiones, quemaduras, electrocución o heridas originadas por explosión.-

[Firma manuscrita]
MP



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

5.- PROTECCION CONTRA EL RUIDO:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que el ruido percibido por los ocupantes y las personas que se encuentren en las proximidades se mantenga a un nivel que no ponga en peligro su salud y que les permita dormir, descansar y trabajar en condiciones satisfactorias.-

6.- AHORRO DE ENERGIA Y AISLAMIENTO TERMICO:

Las obras y sus sistemas de iluminación, calefacción, refrigeración y ventilación deberán proyectarse y construirse de forma que la cantidad de energía necesaria para su utilización sea moderada, habida cuenta las condiciones climáticas del lugar, sus ocupantes y la frecuencia de uso de las instalaciones.-

7.- MANTENIMIENTO:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma tal que las tareas de mantenimiento y conservación estén reducidas al mínimo. Para ello se extremará la selección de materiales y dispositivos constructivos en los sectores de la obra de uso mas frecuente y/o dificultosa accesibilidad.-

8.- RESTRICCIONES FUNCIONALES:

Las obras deberán proyectarse y construirse de forma tal que no presenten barreras arquitectónicas ni limitaciones funcionales para el acceso y uso de personas con discapacidad física.-

[Firma]
[Iniciales]

RESOLUCION SSOP N° 3/91



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

BUENOS AIRES, 17 ENE 1991

VISTO la Resolución SSOP N° 59/90 y

CONSIDERANDO:

Que de acuerdo a lo establecido en el Art. 4º corresponde que la SUBSECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS disponga la incorporación al Sistema Reglamentario Argentino para las Obras Civiles (SIREA) de todos aquellos documentos técnicos que considere apropiados.

Que por Resolución MOySP N° 977/83 del 7 de octubre de 1983 fueron aprobados los Reglamentos, Recomendaciones y Disposiciones elaborados por el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC).

Que por Resolución MOySP N° 621/84 del 31 de julio de 1984 fue ratificada la antecitada aprobación y por Resolución MOySP N° 168/85 del 15 de marzo de 1985 fueron aprobadas las actualizaciones de los mismos documentos.

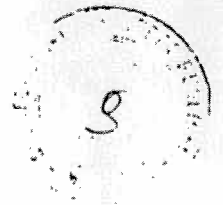
Por ello,

EL SUBSECRETARIO DE OBRAS PUBLICAS

RESUELVE:

ARTICULO 1º: Incorporar al Sistema Reglamentario Ar-

[Firma manuscrita]



Ministerio de Obras y Servicios Públicos

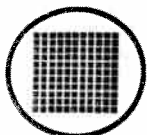
gentino para las Obras Civiles (SIREA) los documentos elaborados por el Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) y que oportunamente fueran aprobados por Resoluciones MOySP Nº 977/83 y 621/84 con las actualizaciones aprobadas por Resolución MOySP Nº 168/85.

ARTICULO 2: Regístrese, comuníquese y archívese.

RESOLUCION SSOP Nº: 3 /91

MJO

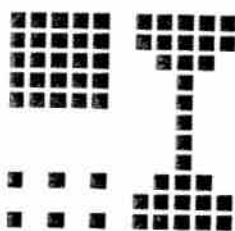
ING. MARIO JOSÉ GUARAGNA
SUBSECRETARIO DE OBRAS PÚBLICAS DE LA NACIÓN



INTI
Instituto Nacional
de Tecnología Industrial

Recomendación CIRSOC 302-1

ISBN 950-532-025-6



Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales
de Seguridad para las Obras Civiles del Sistema INTI

Métodos de Cálculo para los Problemas de Estabilidad del Equilibrio en las Estructuras de Acero

Julio 1982

APROBADO POR RESOLUCIONES DEL
MOySP N° 977/83 y 621/84

INTI CIRSOC

*Av. Cabildo 65 Subsuelo - Ala Savio
(C1426AAA) Ciudad Autónoma de Buenos Aires
República Argentina*

Tel./Fax: (54 11) 4779-5271/5273

Web: www.inti.gob.ar/cirsoc

E-mail: cirsoc@ffmm.gov.ar

cirsoc@inti.gob.ar

Primer Director Técnico († 1980): Ing. Luis María Machado

Directora Técnica: Inga. Marta S. Parmigiani

C 1994

Editado por INTI

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Av. Leandro N. Alem 1067 - 7° piso Buenos Aires - Tel. 313-3013

Queda hecho el depósito que fija la ley 11.723. Todos los derechos, reservados. Prohibida la reproducción parcial o total sin autorización escrita del editor. Impreso en la Argentina.
Printed in Argentina.

CIRSOC

ORGANISMOS PROMOTORES

Ministerio de Obras y Servicios Públicos

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

Ministerio de Obras Públicas de la Provincia de Buenos Aires

Secretaría de Estado de Desarrollo Urbano y Vivienda

Empresa Obras Sanitarias de la Nación

Municipalidad de la Ciudad de Buenos Aires

Comisión Nacional de Energía Atómica

Empresa del Estado Agua y Energía Eléctrica

Dirección Nacional de Vialidad

Hidronor S.A.

MIEMBRO ADHERENTE

Consejo Interprovincial de Ministros de Obras Públicas

ASESORES QUE INTERVINIERON EN LA REDACCION DEL REGLAMENTO CIRSOC 302/1

Coordinador: Ing. César J. Vasino

Asesor: Ing. Horacio Rezk

INDICE

CAPITULO 1. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 1 DEL REGLAMENTO CIRSOC 302	1
1.1. Introducción	1
1.2. Campo de validez	1
1.3. Simbología	1
CAPITULO 2. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.1. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302	5
2.1. Generalidades	5
CAPITULO 3. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.2.3. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302	9
3.1. Introducción	9
3.2. Hipótesis general	9
3.3. Longitudes de pandeo de los cordones de postes y soportes de celosía	10
3.4. Longitudes de pandeo de montantes y diagonales (Pandeo normal al plano del reticulado)	12
CAPITULO 4. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.2.4. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302	17
4.1. Generalidades	17
4.2. Coeficiente de pandeo	19
4.3. La carga crítica F_K y el coeficiente de seguridad γ_K de Engesser	24
4.4. Pandeo por flexotorsión de barras comprimidas axilmente y cuya sección tiene un solo eje de simetría	33
4.5. Barras comprimidas con sección de altura variable	35
4.6. Barras sometidas a compresión axil variable	36
4.7. Barras comprimidas formadas por tramos de distinta	

4.7.	sección y distinto esfuerzo normal apoyadas elásticamente en dirección transversal	38
CAPITULO 5. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.4. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302		45
5.1.	Pandeo alabeado con torsión y flexión de barras comprimidas excéntricamente	47
5.2.	Verificación de la capacidad resistente de barras comprimidas excéntricamente con teoría de segundo orden	49
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.5. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302		51
6.1.	Procedimiento aproximado para la verificación de la estabilidad de los cordones comprimidos en un puente abierto (puente de tablero inferior)	51
6.2.	Cálculo más preciso para la verificación de la estabilidad de los cordones comprimidos de un puente abierto	55
CAPITULO 7. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 3. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302		59
7.1.	Pandeo en su propio plano de arcos parabólicos simétricos	59
CAPITULO 8. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 4. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302		61
8.1.	Longitudes de pandeo de las columnas de pórticos rectangulares de un vano y varios pisos o de un piso y varios vanos	61
8.2.	Longitudes de pandeo de pórticos triangulares	65
CAPITULO 9. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 5. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302		67
9.1.	Pandeo lateral de vigas de sección I	67

III

CAPITULO 10. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 6.2. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302	75
10.1. Abolladura de chapas comprimidas en todo el perímetro	75
10.2. Coeficiente de abollamiento para distintas condiciones de apoyo de los bordes longitudinales	77
CAPITULO 11. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 6.3. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302	79
11.1. Rigidez mínima de los rigidizadores longitudinales y transversales, que sirven para subdividir la chapa del alma en paños individuales	79
11.2. Tensión de abollado de las chapas de alma rigidizadas	86

CAPITULO 1. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 1 DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

1.1. INTRODUCCION

El equilibrio que en una estructura cargada se establece entre las fuerzas exteriores y las fuerzas internas, puede ser estable o inestable. Es estable cuando para obtener cualquier deformación muy pequeña, de la estructura cargada, es necesario emplear un trabajo positivo. La estabilidad, para muchas estructuras y tipos de sollicitación, sólo se presenta para valores de las cargas relativamente pequeños. Para valores más elevados existe, al menos, una deformación virtual para cuya obtención no es necesario efectuar ningún trabajo positivo, es decir ningún aporte de energía. Si para una, al menos, de estas pequeñas deformaciones, el trabajo adicional (infinitésimo de segundo orden) es nulo y positivo para cualquier otra, estaremos ante el "límite de estabilidad", a partir del cual se pierde esta propiedad.

1.2. CAMPO DE VALIDEZ

Esta Recomendación se podrá aplicar en la verificación de la estabilidad del equilibrio en estructuras de acero de acuerdo con lo indicado en el artículo 1.2. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero".

1.3. SIMBOLOGIA

Para las designaciones en los cálculos de la resistencia y dibujos valen las siguientes indicaciones:

σ_K tensión crítica de pandeo de Engesser;

F_K o N_K carga crítica de pandeo de Engesser. Es ésta la carga en el límite de estabilidad cumpliendo ciertas condiciones ideales (por ejemplo, eje de la barra idealmente recto, aplicación de la fuerza idealmente axial y un material idealmente isótropo);

E_t módulo tangente;

γ_K coeficiente de seguridad de Engesser;

γ_B coeficiente de seguridad a la abolladura en el campo inelástico (de Engesser);

F_{Ki} o N_{Ki} carga crítica ideal de pandeo, también llamada carga crítica de pandeo de Euler. Es ésta la carga en el límite de estabilidad presupo-

niendo además de las condiciones ideales expuestas para la definición de F_K , un material ideal que obedece ilimitadamente a la ley de deformación de Hooke;

σ_{Ki} tensión crítica ideal de pandeo, también llamada tensión crítica de pandeo de Euler;

γ_{Ki} coeficiente ideal de seguridad al pandeo, también llamado coeficiente de seguridad de Euler;

γ_{Bi} coeficiente ideal de seguridad a la abolladura en el campo elástico (de Euler);

F_{Kr} o N_{Kr} carga crítica real, es ésta la máxima carga en el estado de equilibrio, que se obtiene sin aplicación de la condición de material ideal de Hooke y de las condiciones ideales de tipo geométrico;

σ_{Kr} tensión crítica real;

γ_{Kr} coeficiente de seguridad real;

σ_{adm} tensión admisible;

$\sigma_{c adm}$ tensión admisible al pandeo;

$\omega = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{c adm}}$ coeficiente de pandeo;

σ_F tensión en el límite de fluencia;

s ó l longitud de una barra;

s_o distancia entre los centros de los empalmes calculada según el dibujo;

i_y radio de giro de la sección de una barra, referido al eje principal y-y;

s_{Ky} o l_{Ky} longitud de pandeo de la barra para el pandeo perpendicularmente al eje principal y-y de la sección;

$\lambda_y = \frac{s_{Ky}}{i_y}$ esbeltez de la barra para el pandeo perpendicularmente al eje principal y-y de la sección;

i_T radio de torsión de la sección de una barra;

$i_o = \sqrt{i_y^2 + i_z^2}$, radio de giro polar, respecto del baricentro de la sección de una barra;

z_C distancia del centro de corte al centro de gravedad de una sección con un eje de simetría;

a_c y a_t distancias según el eje z desde el borde comprimido y traccionado al centro de gravedad de una sección, respectivamente;

W_c y W_t módulo resistente de la sección bruta de una barra, respecto al lado comprimido y traccionado, respectivamente;

σ_{bc} y σ_{bt} tensión de compresión y tracción a flexión, respectivamente;

C centro de corte de sección de la barra;

I_T constante de torsión libre de la sección de una barra;

I_w momento sectorial de inercia de la sección de una barra;

k coeficiente de pandeo lateral o abolladura;

e excentricidad de aplicación de la fuerza de compresión;

OBSERVACION: Todas las fuerzas y tensiones han de introducirse en las fórmulas con sus valores absolutos (sin signo), a menos que se indique expresamente lo contrario.

CAPITULO 10. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 6.2. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

10.1. ABOLLADURA DE CHAPAS COMPRIMIDAS EN TODO EL PERIMETRO

10.1.1. Cuando una chapa rectangular articulada en sus cuatro bordes es solicitada a lo largo del lado b con tensiones de compresión σ_y , uniformemente distribuidas y a lo largo del lado a con tensiones uniformemente distribuidas

$$\sigma_z = \Omega \cdot \sigma_y$$

siendo $0 \leq \Omega \leq 1$ (figura 29), se alcanza el límite ideal de abollamiento cuando

$$\sigma_{yKi} = k_y \sigma_e$$

La magnitud auxiliar σ_e se da en el artículo 6.2.1. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero" y para el coeficiente k_y de abolladura rigen las siguientes expresiones:

$$\left. \begin{array}{l} 1,0 \geq \Omega \geq 0,5 \text{ para todos los } \alpha \\ 0,5 > \Omega \geq 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{para } \alpha \leq \frac{1}{\sqrt{1-2\Omega}} \\ \text{para } \alpha > \frac{1}{\sqrt{1-2\Omega}} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} k_y = \frac{\left(\frac{1}{\alpha} + \alpha\right)^2}{1 + \Omega \alpha^2} \\ k_y = 4 (1 - \Omega) \end{array} \right.$$

10.1.2. La tensión ideal de comparación vale

$$\sigma_{VKi} = \sigma_{yKi} \cdot \sqrt{1 + \Omega^2 - \Omega}$$

y para el coeficiente de seguridad contra el abollamiento se tiene

$$\gamma_K = \frac{\sigma_{VK}}{\sigma_y \sqrt{1 + \Omega^2 - \Omega}}$$

Para ello se debe sacar de la tabla 11 del Reglamento CIRSOC 302 la tensión reducida de comparación σ_{VK} correspondiente al valor σ_{VKi} . Los valores intermedios deben interpolarse linealmente y para cálculos estimativos aproximados se debe también tomar en cuenta la figura 21 de dicho reglamento.

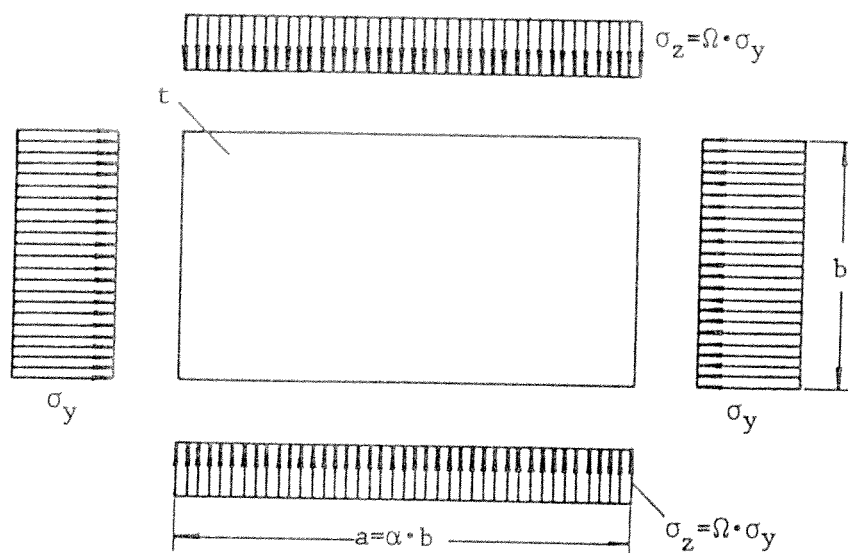


Figura 29

10.1.3. El valor mínimo del coeficiente de seguridad contra el abollamiento es el establecido en el artículo 6.2.4. del Reglamento CIRSOC 302.

10.1.4. Las fórmulas dadas en el artículo 10.1.1. pueden también emplearse para el cálculo de la tensión ideal de abollamiento de chapas rectangulares que sólo sufren compresión uniforme en la dirección longitudinal, cuyas condiciones idealizadas de apoyo excepcionalmente prescriban que la distancia relativa b de ambos bordes longitudinales no sufre ninguna modificación (ni siquiera la más mínima). En la dirección normal aparece entonces la tensión de compresión

$$\sigma_z = \nu \sigma_y$$

de modo que en las fórmulas del artículo 10.1.1. y 10.1.2. se debe introducir el coeficiente $\Omega = \nu$, siendo ν el coeficiente de Poisson.

10.2. COEFICIENTES DE ABOLLAMIENTO PARA DISTINTAS CONDICIONES DE APOYO DE LOS BORDES LONGITUDINALES

10.2.1. Si una chapa rectangular está libre de empotramiento en los bordes longitudinales "b", mientras que en los bordes transversales "a" las condiciones de borde se hallan como lo indica la figura 30 d hasta h, rigen los coeficientes de abollamiento dados en la tabla 8 para los tipos de carga indicados en la figura 30 a, b y c.

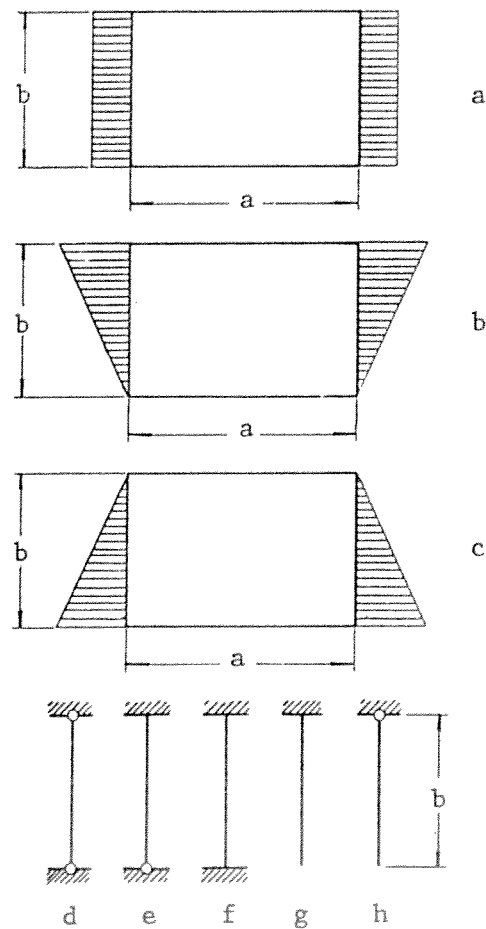


Figura 30

Tabla 8.

	Fig. 30 d		Fig. 30 e		Fig. 30 f		Fig. 30 g		Fig.30 h
Coeficien- tes de abo- llamiento	k	para $\alpha \geq$	k	para $\alpha \geq$	k	para $\alpha \geq$	k	para $\alpha \geq$	k
Fig. 30 a	4,00	1,00	5,40	0,79	6,97	0,67	1,28	1,63	0,43
Fig. 30 b	7,81	0,98	12,16	0,77	13,56	0,65	6,26	1,58	1,71
Fig. 30 c	7,81	0,98	9,89	0,80	13,56	0,65	1,64	1,67	0,57

CAPITULO 11. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 6.3. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

11.1. RIGIDEZ MINIMA DE LOS RIGIDIZADORES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES, QUE SIRVEN PARA SUBDIVIDIR LA CHAPA DEL ALMA EN VARIOS RECUADROS

11.1.1. A cada tensión ideal de abollamiento (artículo 6.2. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero") corresponde una determinada superficie ideal de abollamiento, de acuerdo con la cual la chapa se deforma al comenzar el abollamiento. Los rigidizadores tienen por misión oponer resistencia a esa deformación y de ese modo incrementar la tensión ideal de abollamiento. Los rigidizadores ubicados en aquellas partes donde por efecto del abollamiento de la chapa, supuesta sin rigidización, no se produce ninguna deflexión (líneas nodales de la superficie de abollamiento de la chapa no rigidizada), son por lo tanto ineficaces.

11.1.2. Los rigidizadores se colocan transversal o longitudinalmente y, excepcionalmente, inclinados. En recuadros de grandes dimensiones puede ejecutarse un emparrillado compuesto de rigidizadores longitudinales y transversales. La eficacia de la rigidización resulta aumentada cuando los rigidizadores longitudinales y transversales se empotran en sus extremos y se unen rígidamente entre sí en los puntos de cruce del emparrillado.

11.1.3. Los rigidizadores pueden disponerse a un solo lado o a ambos lados de la chapa. Si el baricentro de la sección bruta del rigidizador, A, está ubicado en el plano medio de la chapa (disposición centrada, figura 31 a) en el cálculo de la rigidez flexional del rigidizador se debe introducir el momento de inercia $I = I_x$, de la sección bruta del rigidizador respecto de su eje baricéntrico x-x. Si, por el contrario, aquel punto está ubicado fuera del citado plano medio y a una distancia d del mismo (disposición excéntrica, ver figura 31 b) en el cálculo de la rigidez flexional del rigidizador se debe introducir el momento de inercia

$$I = I_x + A \left(d - \frac{t}{2} \right)^2$$

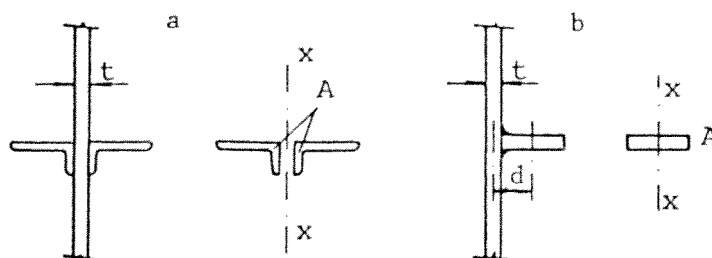


Figura 31

11.1.4. En la fijación del valor mínimo de la rigidez flexional que debe poseer un rigidizador longitudinal o transversal de acuerdo con los artículos 6.3.1. y 6.3.2. del Reglamento CIRSOC 302, con el objeto de incrementar la tensión ideal de abollamiento de la chapa, hasta la tensión ideal de abollamiento del recuadro parcial más solicitado, supuesto articulado en sus bordes, y con ello admitir en el estudio de la abolladura de la chapa una división de los recuadros en recuadros parciales articulados, se obtiene un valor mínimo del momento de inercia de la sección, en base a hipótesis ideales:

$$I^* = \theta^* \frac{b t^3}{12 (1 - \nu^2)} = 0,092 \cdot \theta^* \cdot b \cdot t^3$$

siendo:

θ^* un coeficiente que depende de la carga y de la relación de los lados $\alpha = a/b$, de la disposición de los rigidizadores y (en el caso de rigidizadores solicitados axialmente) de la magnitud auxiliar

$$\delta = \frac{A}{b \cdot t};$$

A la sección bruta del rigidizador;

a y b el largo y la altura de los recuadros de la chapa del alma logrados por la subdivisión con los rigidizadores;

t el espesor de la chapa del alma;

$\nu = 0,296$ el coeficiente de Poisson del acero.

El momento de inercia calculado de acuerdo con el artículo 11.1.3. debe satisfacer la condición $I \geq 0,092 \cdot \theta^* \cdot b \cdot t^3$ en todos aquellos casos en que se haya llevado a cabo la mencionada división de los recuadros de alma en recuadros parciales libremente apoyados.

11.1.5. En los rigidizadores que no están solicitados axilmente (tabla 9, fila 3, 5 y 8 hasta 15) o cuya tensión axil es menor que σ_1 (tabla 9, fila 1, 6 y 7), en todos los casos en que la tensión ideal de comparación σ_{VKi} de la chapa rigidizada sobrepasa el límite de proporcionalidad $\sigma_E = 0,8 \sigma_F$, la teoría conduce a una disminución del coeficiente θ^* , que en lo que sigue no se tiene en cuenta; con ello la seguridad aumenta en los casos mencionados.

11.1.6. En la tabla 9 se han reunido expresiones aproximadas del coeficiente θ^* para casos simples de carga y distintas disposiciones posibles de los rigidizadores. Un rigidizador que se dimensione de acuerdo con los artículos 11.1.3. hasta 11.1.5., en base a dicho coeficiente, permite prácticamente elevar la tensión de abollamiento de la chapa hasta el valor que correspondería a los recuadros rayados en el dibujo, en el caso de tener sus cuatro bordes articulados. Si el peligro de abollamiento para los distintos recuadros parciales es diferente, el recuadro rayado es aquél para el cual dicho peligro es mayor.

11.1.7. Si la chapa es solicitada simultáneamente por tensiones normales de repartición lineal y tensiones tangenciales uniformemente distribuidas, se debe tomar aproximadamente:

$$\theta^* = \theta_1^* \frac{\gamma_{B1}}{\gamma_{B2}} + \theta_2^* \frac{\gamma_{B2}}{\gamma_{B2}}$$

siendo:

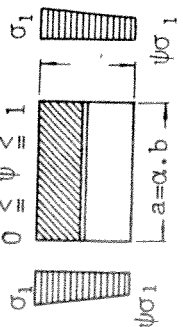
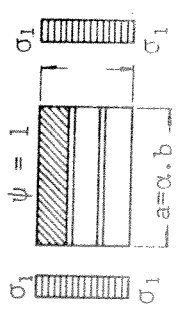
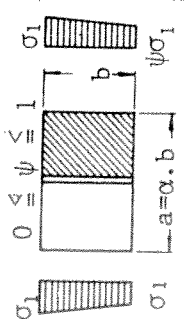
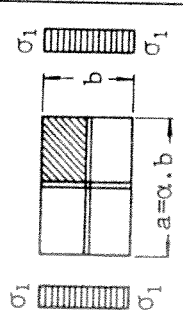
θ_1^* el coeficiente de rigidez mínima para el caso de actuación exclusiva de las tensiones normales;

θ_2^* el coeficiente de rigidez mínima para el caso de actuación exclusiva de las tensiones tangenciales;

γ_{B1} o γ_{B2} los coeficientes de seguridad frente a la abolladura calculados según el artículo 6.2.3. del Reglamento CIRSOC 302, que valdrían, respectivamente, para el recuadro más peligroso, cuando éste está solicitado solamente por las tensiones normales o solamente por las tangenciales consideradas;

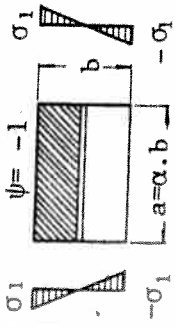
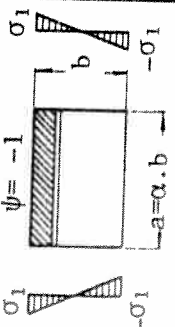
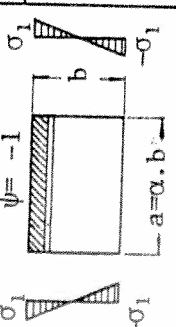
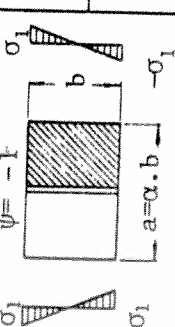
γ_{B1} o γ_{B2} los coeficientes de seguridad frente a la abolladura de aquel recuadro que, para la sollicitación simultánea por tensiones normales y tangenciales, presenta el mayor peligro de abolladura con las rigideces mínimas correspondientes a θ_1^* o θ_2^* .

Tabla 9

Tipo de cargas y ubicación de los rigidizadores		Ambito de validez	Rigidez mínima
Tensiones de compresión repartidas linealmente a lo largo de la altura del recuadro			
1	1 rigidizador longitudinal en el medio de la altura	 $0 \leq \psi \leq 1$ $a = \alpha \cdot b$	$\theta^* = (0,53 + 0,47\psi) \left\{ \frac{\alpha^2}{2} \left[16(1+2\delta) - 2 \right] - \frac{\alpha^4}{2} + \frac{1+2\delta}{2} \right\}$
			$\theta^* = (0,53 + 0,47\psi) \left\{ \frac{1}{2} \left[8(1+2\delta) - 1 \right]^2 + \frac{1+2\delta}{2} \right\}$
2	2 rigidizadores longitudinales iguales en los tercios de la altura	 $\psi = 1$ $a = \alpha \cdot b$	$\theta^* = \frac{\alpha^2}{3} \left[36(1+3\delta) - 2 \right] - \frac{\alpha^4}{3} + \frac{1+3\delta}{3}$
			$\theta^* = \frac{1}{3} \left[18(1+3\delta) - 1 \right]^2 + \frac{1+3\delta}{3}$
3	1 rigidizador transversal en el medio de la longitud	 $0 \leq \psi \leq 1$ $a = \alpha \cdot b$	$\theta^* = \frac{4 \left(\frac{4}{\alpha^2} - \frac{\alpha^2}{4} \right)}{\pi^2 \alpha \left(1 - \frac{\pi^2 \alpha^4}{12\alpha^4 - 48} \right)}$
			Rigidizador transversal prácticamente ineficaz
4	1 rigidizador longitudinal en el medio de la altura y un rigidizador transversal en el medio de la longitud	 $a = \alpha \cdot b$	$\theta_L^* = \frac{(1+\alpha^2)^2 \left[4(1+2\delta_L) - 1 \right]}{2(1+\alpha^3)}$
			donde: $\rho = \frac{\theta_0}{\theta_L} = \frac{I_0}{I_L}$

(continúa)

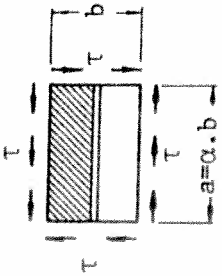
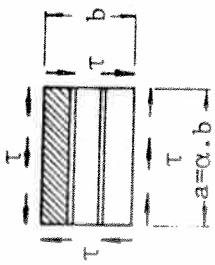
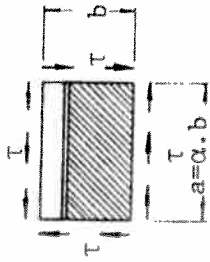
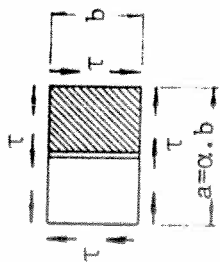
Tabla 9 (continuación)

Tipo de cargas y ubicación de los rigidizadores		Ambito de validez	Rigidez mínima
Tensiones normales repartidas linealmente con iguales valores en los bordes			
5	1 rigidizador longitudinal en el medio de la altura. 		$\theta^* = 1,3$
6	1 rigidizador longitudinal del borde comprimido 	$\alpha \leq 0,5$	$\theta^* = 2,4 + 18,4\delta$
		$\alpha > 0,5$	$\theta^* = (12 + 92\delta) (\alpha - 0,3)$ No mayor que: $\theta^* = 16 + 200\delta$
7	1 rigidizador longitudinal del borde comprimido 	$0,5 \leq \alpha \leq 1,0$	$\theta^* = (21,3 + 112,6\delta) (\alpha - 0,1)$
		$\alpha > 1,0$	$\theta^* = (32,0 + 168,9\delta) (\alpha - 0,4)$ No mayor que: $\theta^* = 50 + 200\delta$
8	1 rigidizador transversal en el medio de la longitud * 	$0,6 \leq \alpha \leq 0,935$	$\theta^* = 6,2 - 12,7\alpha + 6,5\alpha^2$
		$\alpha > 0,935$	Rigidizador transversal prácticamente ineficaz

*Ver nota de pie en la página 85.

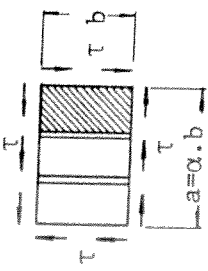
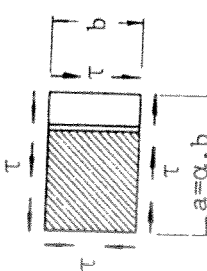
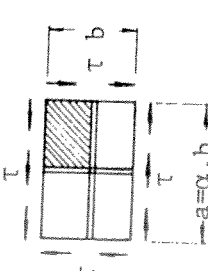
(continúa)

Tabla 9 (continuación)

Tipo de carga y ubicación de los rigidizadores		Ambito de validez	Rigidez mínima
Tensiones tangenciales repartidas uniformemente			
9	1 rigidizador longitudinal en el medio de la altura 	$0,5 \leq \alpha \leq 2,0$	$\theta^* = 5,4\alpha^2 (2\alpha + 2,5\alpha^2 - \alpha^3 - 1)$
10	2 rigidizadores longitudinales iguales en los tercios de la altura 	$0,3 \leq \alpha \leq 1,0$	$\theta^* = 12,1\alpha^2 (4,4\alpha - 1)$
11	1 rigidizador longitudinal en el cuarto de la altura 	$0,5 \leq \alpha \leq 2,0$	$\theta^* = 7,2\alpha^2 (1-3,3\alpha + 3,9\alpha^2 - 1,1\alpha^3)$
12	1 rigidizador transversal en el medio de la longitud. 	$0,5 \leq \alpha \leq 2,0$	$\theta^* = \frac{5,4}{\alpha} \left(\frac{2}{\alpha} + \frac{2,5}{\alpha^2} - \frac{1}{\alpha^3} - 1 \right)$

(continúa)

Tabla 9 (continuación)

Tipo de carga y ubicación de los rigidizadores		Ambito de validez	Rigidez mínima
13	2 rigidizadores transversales iguales en los tercios de la longitud 	$1,0 \leq \alpha \leq 3,3$	$\theta^* = \frac{12,1}{\alpha} \left(\frac{4,4}{\alpha} - 1 \right)$
14	1 rigidizador transversal en el cuarto de la longitud 	$0,5 \leq \alpha \leq 2,0$	$\theta^* = \frac{7,2}{\alpha} \left(1 - \frac{3,3}{\alpha} + \frac{3,9}{\alpha^2} - \frac{1,1}{\alpha^3} \right)$
15	1 rigidizador longitudinal en el medio de la altura y un rigidizador transversal en el medio de la longitud * 	$0,5 \leq \alpha \leq 2,0$	$\theta^* Q = 6,0 \frac{(1+\alpha^2)^2}{\frac{1}{\rho} + \alpha^3}$ donde: $\rho = \frac{\theta Q}{\theta_L} = \frac{I_Q}{I_L}$

*Ambos rigidizadores tienen que ejecutarse en el punto de cruce con rigidez a la flexión no disminuía.

11.2. TENSION DE ABOLLADO DE LAS CHAPAS DE ALMA RIGIDIZADAS

11.2.1. Si no se dimensionan los rigidizadores de los recuadros según las rigideces mínimas calculadas con los coeficientes θ^* indicados en el artículo 11.1., sino que se dimensionan de acuerdo con el segundo camino reseñado en el artículo 6.3.2. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", debe calcularse el coeficiente de abolladura k para el recuadro rigidizado y comprobar la seguridad frente a la abolladura γ_B exigida en el artículo 6.2.4. del reglamento citado. Cuando se verifica este caso los valores de los coeficientes θ de los rigidizadores son más pequeños que los coeficientes θ^* de las rigideces mínimas. Para algunos casos de carga importantes y distintas disposiciones de los rigidizadores, deben tomarse de la tabla 10 los coeficientes de abolladura k en el caso en que los bordes estén articulados. La dependencia del coeficiente de abolladura k de la relación de lados α queda representada para algunos coeficientes de rigidez θ en las figuras 32 a 35. En particular puede tomarse el coeficiente de abolladura k de acuerdo con la línea 6 de la tabla 10 para los casos especiales $\theta_L = \theta_Q$ y $\theta_L = 1/2 \theta_Q$, y aún más exactamente de las figuras 34 y 35.

En las fórmulas de la tabla 10, es

$$\theta = \frac{I}{0,092 b t^3} ; \quad \delta = \frac{A}{b t}$$

siendo:

- t el espesor de la chapa;
- A el área de la sección bruta del rigidizador
- I el momento de inercia de la sección bruta del rigidizador, calculado según lo indicado en el artículo 11.1.3.
- $a = \alpha b$, la longitud del recuadro;
- b la altura del recuadro.

Para todos los valores $\theta > \theta^*$ debe calcularse el coeficiente de abolladura k de acuerdo con la tabla 10 del Reglamento CIRSOC 302, para el recuadro parcial más peligroso formado por rigidizadores intermedios y señalado en el dibujo por el rayado.

11.2.2. Si una chapa reforzada mediante un rigidizador elástico intermedio está solicitada no sólo por tensiones normales de compresión repartidas linealmente a lo largo de la altura b (con los valores de borde σ_1 y $\psi\sigma_1$, $0 \leq \psi \leq 1$), sino que además está sometida a tensiones tangenciales τ unifor-

memente repartidas, puede realizarse el estudio de la abolladura, en primera aproximación, de acuerdo con los artículos 6.2.1., 6.2.3. y 6.2.4. del Reglamento CIRSOC 302. Cada una de las tensiones de abolladura σ_{1Ki} y τ_{Ki} deben calcularse, en este caso, para la chapa reforzada mediante un rigidizador elástico intermedio, de acuerdo con la tabla 10.

Si θ es mayor o igual que θ^* determinado en forma aproximada con el artículo 11.1.7., ha de llevarse a cabo el estudio de la abolladura para el recuadro parcial formado por rigidizadores intermedios, supuesto simplemente apoyado.

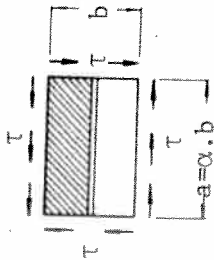
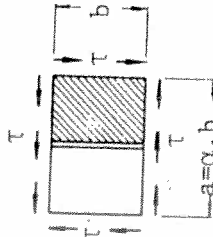
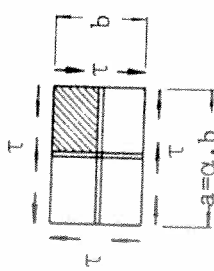
Tabla 10

Tipo de carga y ubicación de los rigidizadores		Ambito de validez	Coefficiente k
1	Tensiones de compresión distrib. linealmente en la altura b Rigidizador longitudinal en el medio de la altura	$\alpha \leq \sqrt[4]{1 + 2\theta}$	$k = \frac{2}{0,95(\psi + 1,1)} \cdot \frac{(1+\alpha^2)^2 + 2\theta}{\alpha^2 (1+2\delta)}$
		$\alpha > \sqrt[4]{1 + 2\theta}$	$k = \frac{4}{0,95(\psi + 1,1)} \cdot \frac{1 + \sqrt{1+2\theta}}{1+2\delta}$
2	Tensiones de compresión distribuidas linealmente en la altura b. Rigidizador transversal en el medio de la longitud	$0,4 \leq \alpha \leq 1,0$	$k = \frac{A - \sqrt{A^2 - B}}{1,43\alpha^2 (\psi + 1,1)}$ $A = 1,5(1+\alpha^2)^2 + 0,167(9+\alpha^2)^2 + 3,33\alpha^3\theta$ $B = (1+\alpha^2)^2(9+\alpha^2)^2 + 2\alpha^3\theta [(1+\alpha^2)^2 + (9+\alpha^2)^2]$
3	Tensiones de compresión uniformemente distribuidas en la altura b. Rigidizadores cruzados en el centro*	$0,9 \leq \alpha \leq 1,1$	$k = \frac{(1+\alpha^2)^2 + 2(\theta_L + \theta_Q \cdot \alpha^3)}{\alpha^2(1 + 2\delta_L)}$

*Ver nota de pie en la pagina 85

(continúa)

Tabla 10 (continuación)

Tipo de carga y ubicación de los rigidizadores		Ambito de validez	Coefficiente k
4	Tensiones tangencia- les distribuidas uni- formemente. Rigidizador longitu- dinal en el medio de la altura		$k = \frac{4,93(1+\alpha^2)}{\alpha^3 \sqrt{\xi}}$
			$\xi = \frac{10,24(1+\alpha^2)^2 + 3,16(1+9\alpha^2)^2 + 4,05\theta}{(1+\alpha^2)^2(1+9\alpha^2)^2 + 2\theta(1+\alpha^2)^2 + 2\theta(1+9\alpha^2)^2} +$ $+ \frac{10,24(1+\alpha^2)^2 + 0,41(9+\alpha^2)^2 + 13,11\theta}{(1+\alpha^2)^2(9+\alpha^2)^2 + 2\theta(9+\alpha^2)^2 + 162\theta(1+\alpha^2)^2}$
5	Tensiones tangencia- les distribuidas uni- formemente. Rigidizador transver- sal en el medio de la longitud		$k = \frac{4,93(1+\alpha^2)}{\alpha^3 \sqrt{\xi}}$
			$\xi = \frac{10,24(1+\alpha^2)^2 + 0,41(1+9\alpha^2)^2 + 13,11\theta\alpha^3}{(1+\alpha^2)^2(1+9\alpha^2)^2 + 162\theta\alpha^3(1+\alpha^2)^2 + 2\theta\alpha^3(1+9\alpha^2)^2} +$ $+ \frac{10,24(1+\alpha^2)^2 + 3,16(9+\alpha^2)^2 + 4,05\theta\alpha^3}{(1+\alpha^2)^2(9+\alpha^2)^2 + 2\theta\alpha^3(9+\alpha^2)^2 + 2\theta\alpha^3(1+\alpha^2)^2}$
6	Tensiones tangencia- les distribuidas u- niformemente. Rigidizadores cru- zándose en el centro*		$k = 2,60 \frac{1+\alpha^2}{\alpha^3} \sqrt{(1+\alpha^2)^2 + 2(\theta_L + \alpha^3\theta_Q)}$ Para $\begin{cases} \theta_L = \theta_Q \\ \theta_L = \theta_Q \end{cases}$ valores más exactos. Figura 34 Figura 35

*Ver nota de pie en la página 85.

Coefficiente de abolladura k de un recuadro de chapa rigidizada longitudinalmente en el medio de la altura para tensiones tangenciales uniformemente distribuidas (tabla 10, línea 4)

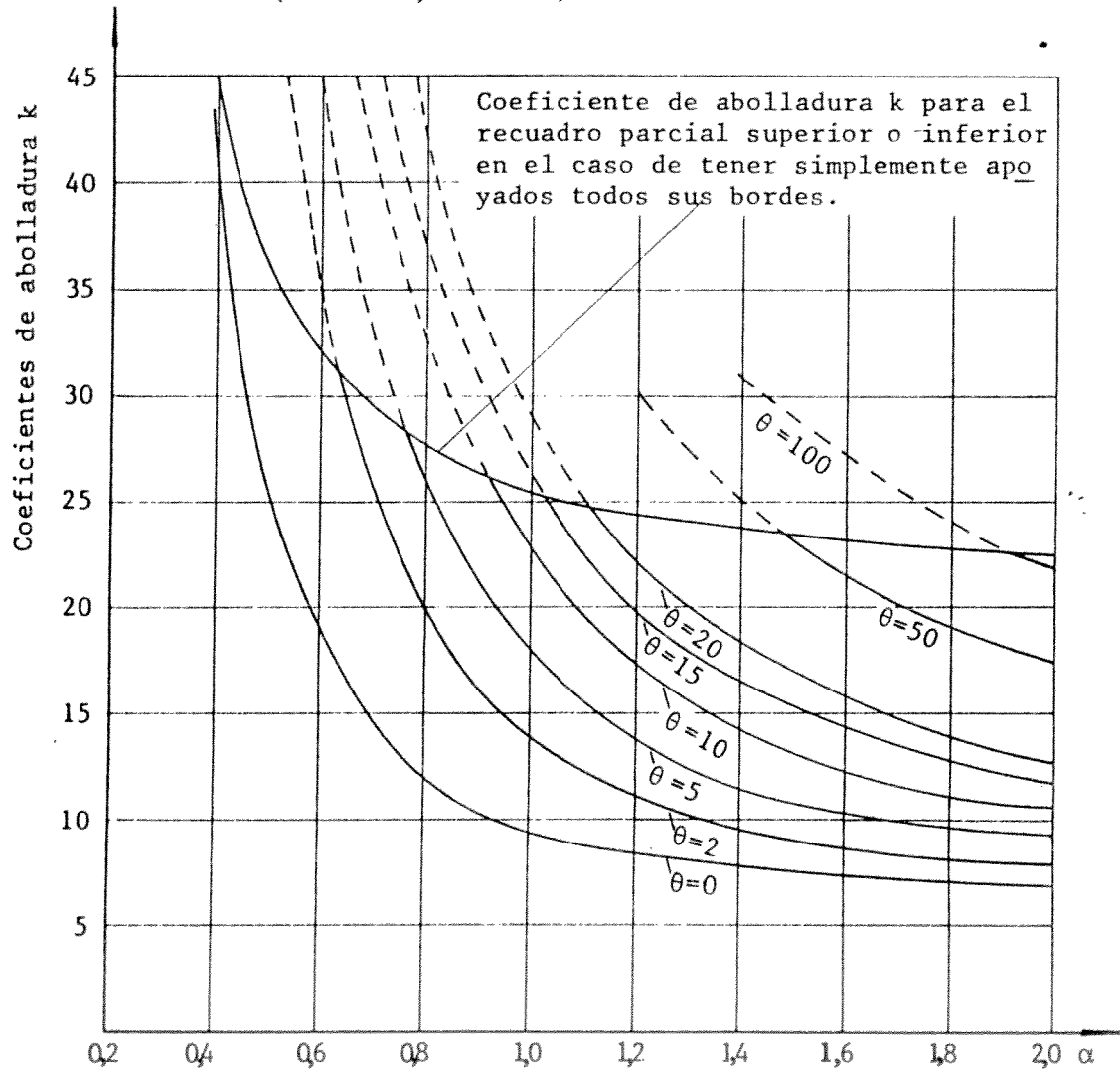
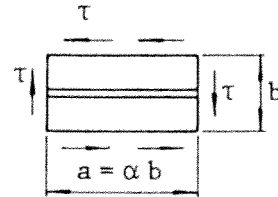


Figura 32

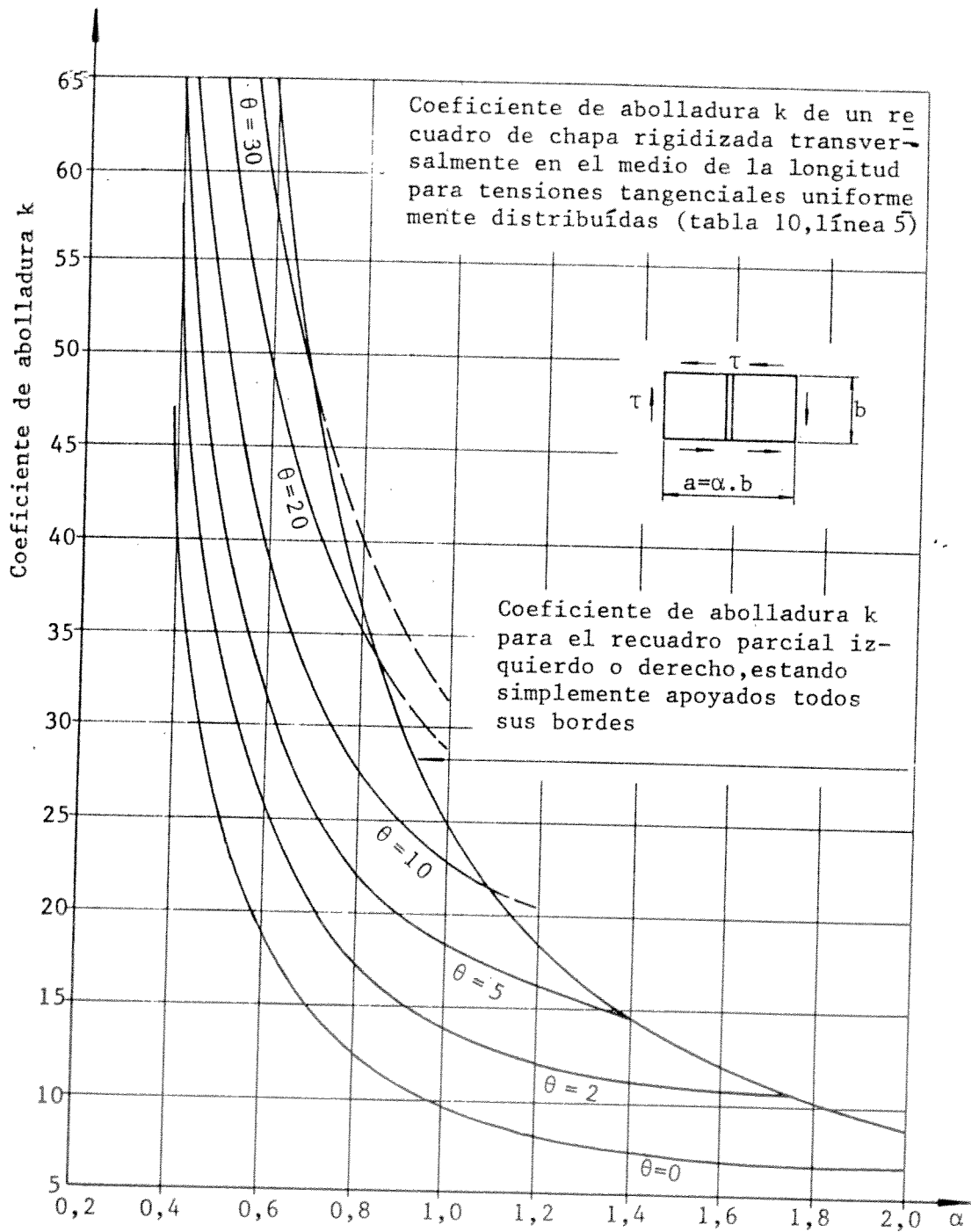
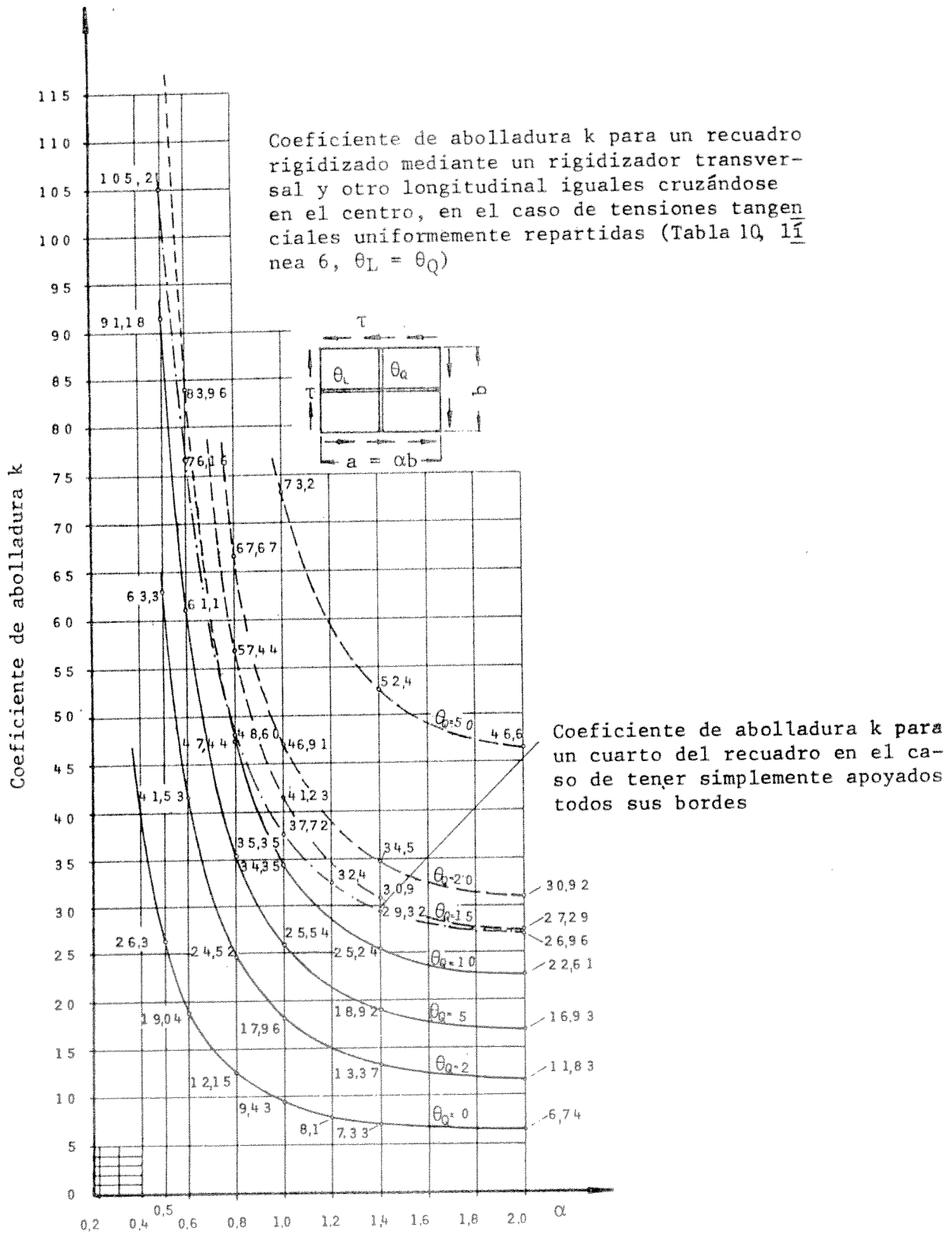


Figura 33



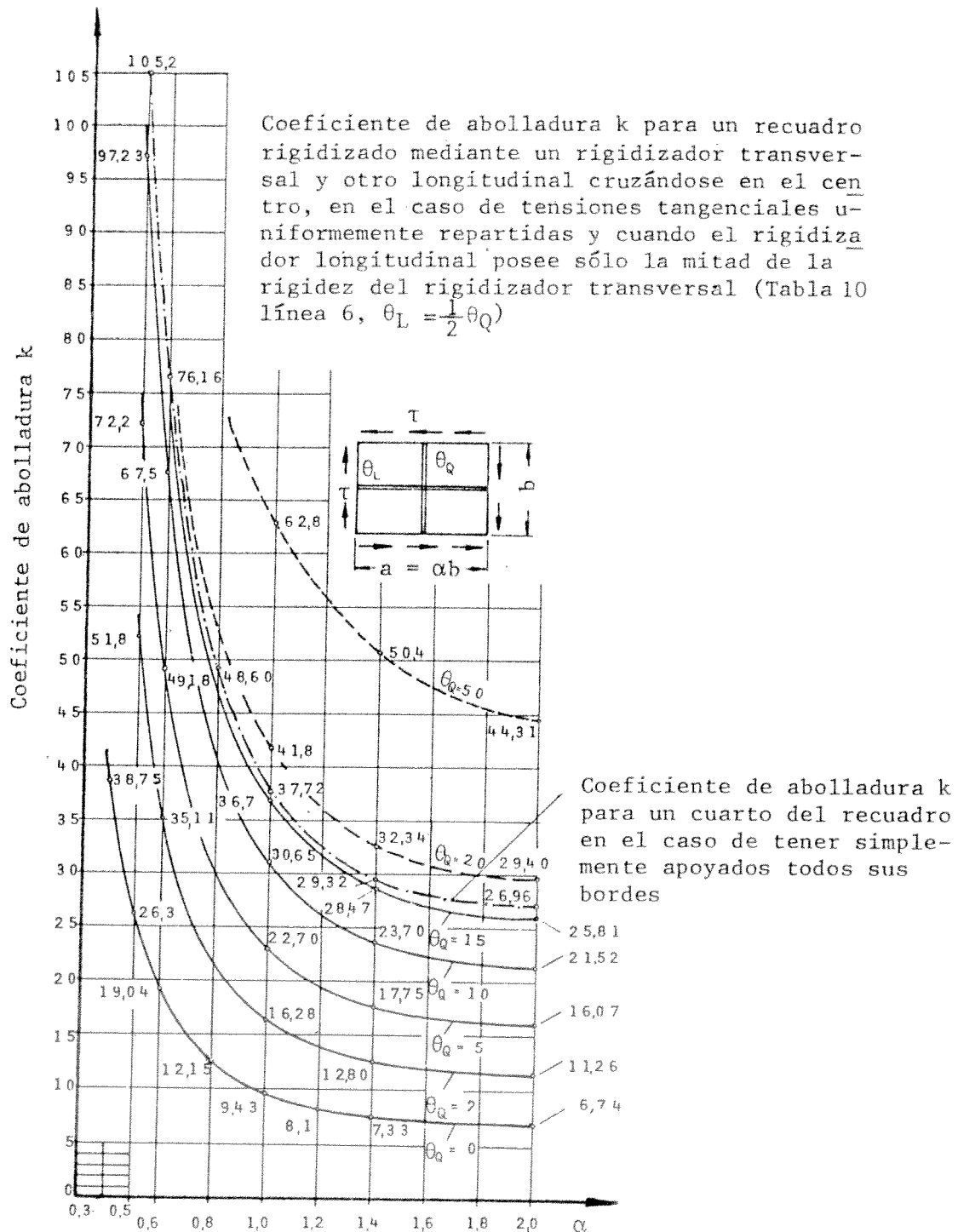


Figura 35

CAPITULO 2. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.1. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

2.1. GENERALIDADES

En las barras de sección abierta de paredes delgadas, es especialmente importante tener presente los diversos modos de pandeo que pueden presentarse. En lo que sigue, se describen los modos de pandeo de barras de sección constante abierta y de paredes delgadas, con extremos articulados sometidos a una fuerza de compresión de dirección paralela al eje de la barra en la configuración no deformada. Según las propiedades geométricas de la sección y la posición del punto de aplicación de la fuerza de compresión, se tienen diversos casos ideales de pandeo.

2.1.1. En el caso de secciones asimétricas en las que el centro de corte no se encuentra sobre un eje principal de inercia (figura 1 a), se tiene

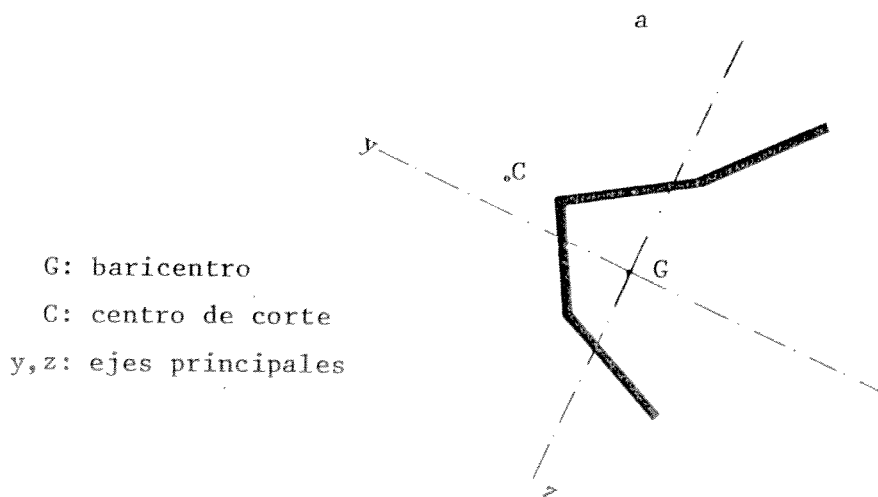


Figura 1

- a) Si la fuerza está aplicada en el baricentro de la sección, sólo es posible el pandeo por flexotorsión (flexión en las direcciones y, z más torsión).
- b) Si la fuerza está aplicada en el centro de corte, se produce la

flexión de la barra en las direcciones y , z , y es posible un pandeo por torsión)

2.1.2. En el caso de secciones en las que el centro de corte se encuentra sobre un eje principal de inercia (figuras 1 b, c y d), pero no coincide con el baricentro.

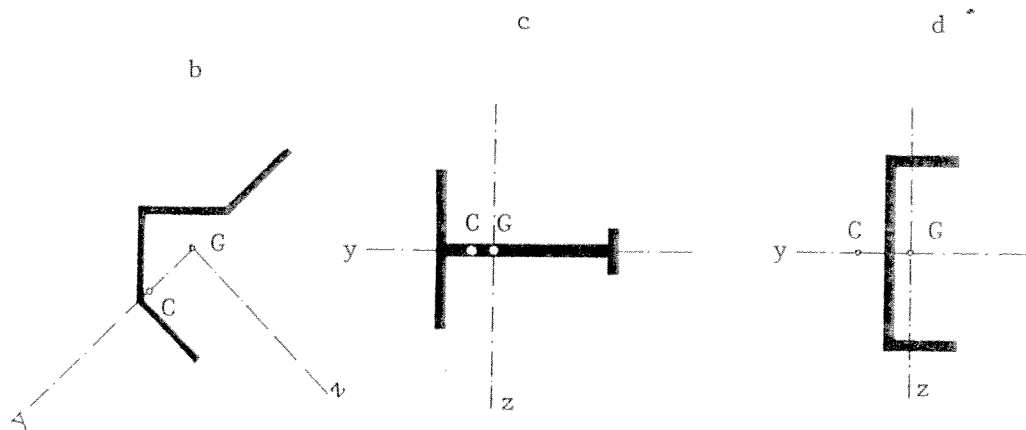


Figura 1

- a) Si la fuerza de compresión está aplicada en el baricentro se pueden producir alguno de los dos siguientes modos de pandeo:
 - pandeo por flexión en la dirección y ,
 - pandeo por flexotorsión (flexión en dirección z , más torsión).
- b) Si la fuerza de compresión está aplicada en el centro de corte se produce la flexión de la barra en la dirección y y puede presentarse el pandeo en alguno de los dos modos siguientes:
 - pandeo por flexión en la dirección z ,
 - pandeo por torsión.
- c) Si la fuerza de compresión está sobre el eje principal y (sin coincidir ni con C ni con G), se produce la flexión de la barra en la dirección y y es posible un pandeo por flexotorsión (flexión en dirección z , más torsión).

2.1.3. En el caso de secciones en las que el centro de corte coincide con el baricentro, como las que tienen dos ejes de simetría (figura 1 e), las que tienen un centro de simetría (figura 1 f) y secciones con un eje de simetría de dimensiones especiales (figura 1 g), se tiene:

- a) Si la fuerza de compresión está aplicada en el baricentro, puede pro-

- ducirse pandeo según uno de los modos siguientes:
- pandeo por flexión en la dirección de un eje principal,
 - pandeo por torsión.
- b) Si la fuerza de compresión está aplicada sobre un punto de uno de los ejes principales de inercia, se produce la flexión en la dirección de ese eje principal y es posible un pandeo por flexotorsión (flexión en la dirección del otro eje principal, más torsión).

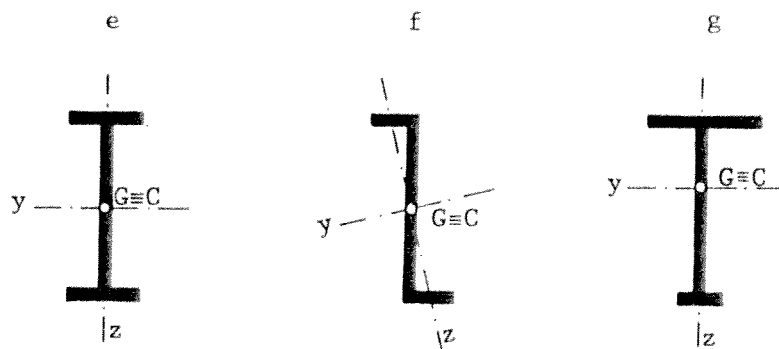


Figura 1

2.1.4. Los modos de pandeo mencionados en los artículos 2.1.1., 2.1.2. y 2.1.3. son casos de pandeo global de la barra, suponiendo que las secciones no se deformen en su propio plano y no incluyen en consecuencia modos de pandeo por abollamiento de las paredes.

CAPITULO 3. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.2.3. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302.

3.1. INTRODUCCION

La longitud de pandeo (s_K) es la longitud de una barra ideal articulada en sus dos extremos que, con la misma sección de la barra estudiada, tiene también su misma carga crítica de pandeo; por lo tanto en una barra articulada en ambos extremos coincide con su longitud en el modelo de análisis de la estructura o longitud teórica (s).

En las barras articuladas en un extremo y perfectamente empotradas en el otro $s_K = 0,699 s \approx 0,70 s$; en las barras perfectamente empotradas en ambos extremos $s_K = 0,50 s$ y finalmente en las barras perfectamente empotradas en un extremo y libres en el otro $s_K = 2 s$.

3.2. HIPOTESIS GENERAL

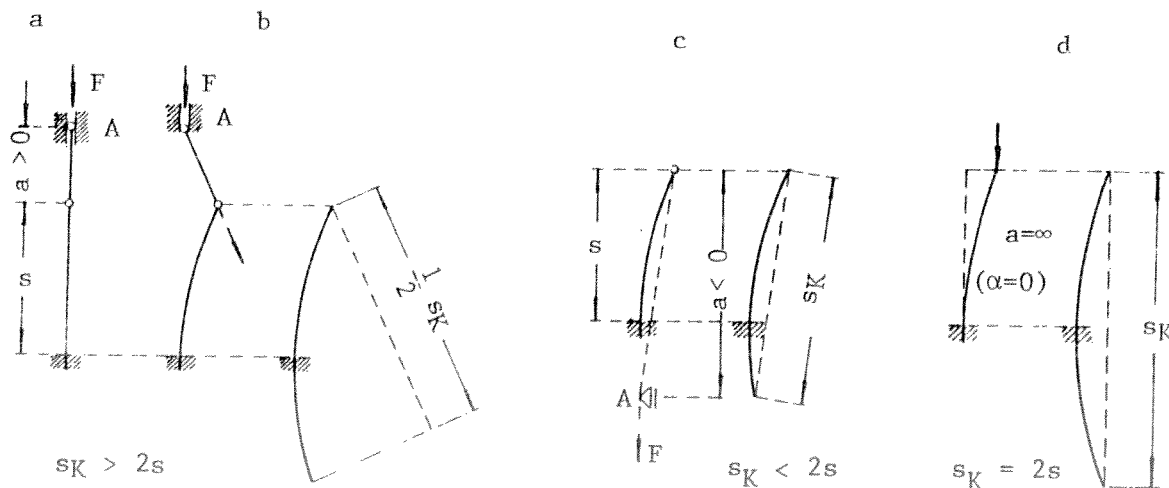


Figura 2

En el cálculo de s_K se supone en general que la fuerza que actúa sobre la barra conserva invariable su dirección durante el pandeo de la barra. Si por excepción no se da esta condición, hay que tenerlo presente en el cálculo de s_K . Si, por ejemplo, en la barra de longitud s y sección constante representada en la figura 2, se obliga mediante medidas constructivas a la

línea de acción de la fuerza que actúa sobre la barra a pasar siempre (por consiguiente durante el pandeo de la barra) por el punto A (a la distancia $a = s/\alpha$ del extremo libre de la barra), hay que calcular la longitud de pandeo s_K mediante la igualdad

$$\operatorname{tg} \frac{\pi \cdot s}{s_K} - \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot \frac{\pi \cdot s}{s_K} = 0$$

Para valores positivos de α (figuras 2 a y b) resulta $s_K > 2.s$ y para valores negativos de α (figura 2 c) resulta $s_K < 2.s$; en los casos especiales $\alpha = 0$ (figura 2 d) $\alpha = -1$ y $\alpha = -\infty$ se obtienen las longitudes de pandeo indicadas en el artículo 3.1., $s_K = 2.s$, $s_K = s$ y $s_K = 0,7.s$.

3.3. LONGITUDES DE PANDEO DE LOS CORDONES DE POSTES Y SOPORTES DE CELOSIA

3.3.1. Si la barra es un cordón de esquina de un poste de celosía, de cuatro caras, solicitado preponderantemente a la flexión, y formada por angulares de alas iguales (figura 3 a) las longitudes de pandeo a considerar (s_K) serán las indicadas en las figuras 3 b, c, d y e para diferentes tipos de retícula y distintas secciones

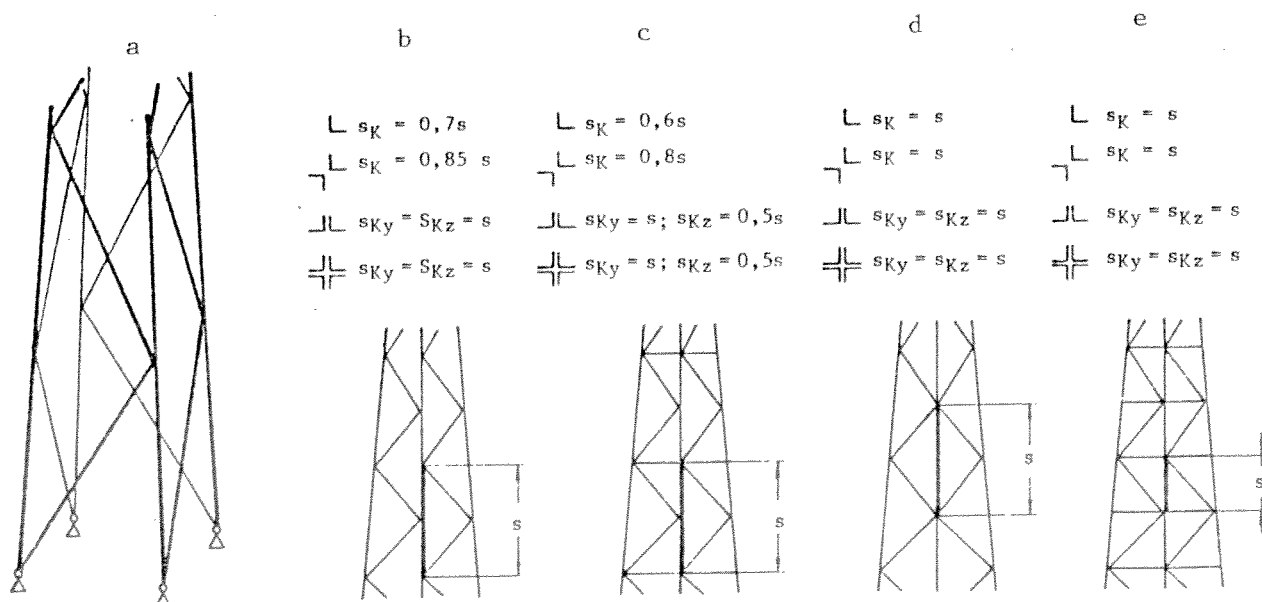


Figura 3

Esto es válido para las retículas de las figuras 3 b y c siempre que la compresión del cordón disminuya en cada medio tramo y de abajo hacia arriba, por lo menos un 10% del mayor valor actuante en el medio tramo superior. Co-

mo compresión se tomará el valor máximo y como esbeltez, en todos los casos, el valor

$$\lambda = \frac{s_K}{i_{\min}}$$

siendo:

$i_{\min}$ el menor radio de giro de la sección del cordón.

Por excepción, en los postes de líneas eléctricas, cuyos cordones están constituídos por un solo angular de lados iguales y cuya celosía sea de los tipos de las figuras 3 b y c, puede determinarse la esbeltez, bajo el supuesto de una longitud de pandeo $s_K = s$ con el radio de giro correspondiente a uno de los ejes de inercia paralelos a las alas del angular.

3.3.2. Si la barra es un cordón de esquina de una torre de celosía de cuatro caras, solicitada preponderantemente a compresión y formada por angulares de alas iguales (palizada o columna de celosía) (figura 4 a) las longitudes de pandeo a considerar (s_K) serán las indicadas en las figuras 4 b, c, d y e para diferentes tipos de retícula y distintas secciones. Esto es válido para las retículas de las figuras 4 b y c siempre que la compresión del cordón disminuya cada medio tramo y de abajo hacia arriba, como máximo un 10% del mayor valor actuante en el medio tramo superior.

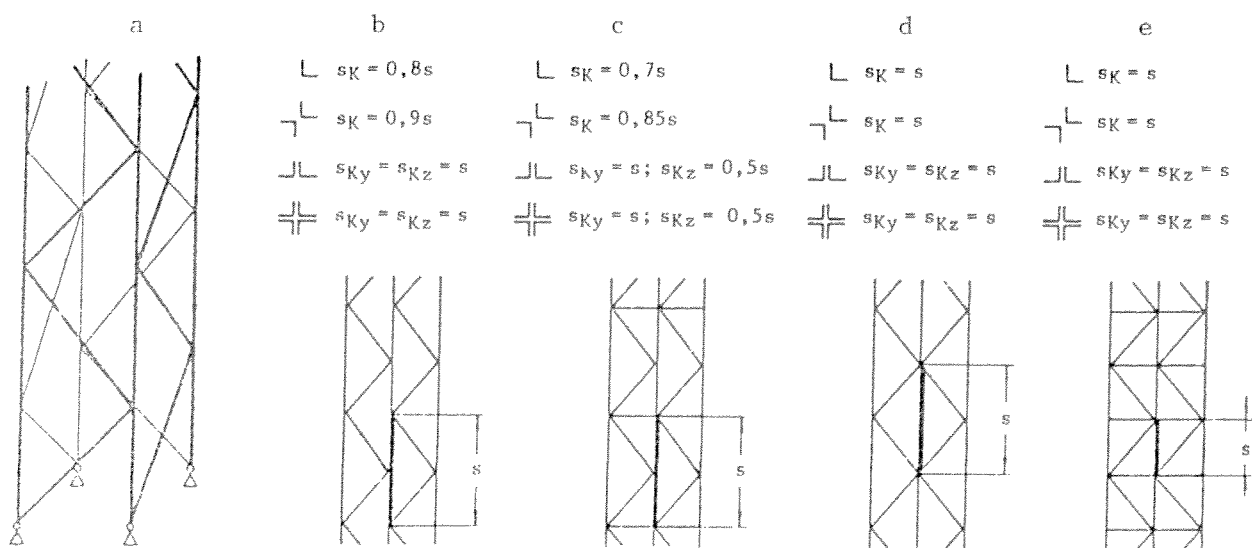


Figura 4

Como compresión se tomará el valor máximo y como esbeltez, en todos los casos, el valor

$$\lambda = \frac{s_K}{i_{\min}}$$

siendo:

$i_{\min}$ el radio de giro mínimo de la sección del cordón.

3.3.3. Si el cordón del poste o soporte de celosía está constituido por dos o cuatro angulares con las alas adyacentes (sección  o ) y paralelas a los planos de celosía, hay que efectuar la comprobación al pandeo en cada uno de los dos planos. Como esbeltez se tomará el mayor de los dos valores

$$\lambda_y = \frac{s_{Ky}}{i_y} \quad ; \quad \lambda_z = \frac{s_{Kz}}{i_z}$$

3.3.4. En el cálculo de la compresión máxima del cordón hay que tener en cuenta, tanto los esfuerzos de compresión como los de flexión de la estructura. Con esta compresión máxima y las esbelteces definidas en los artículos 3.3.1., 3.3.2. y 3.3.3. se utilizará el procedimiento de comprobación indicado en el artículo 2.2.4. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en estructuras de acero". En los soportes de celosía hay que tener en cuenta además, las prescripciones de los artículos 2.2.5.4.1. y 2.2.5.4.2. del Reglamento (para la pieza total solicitada a compresión axil).

3.4. LONGITUDES DE PANDEO DE MONTANTES Y DIAGONALES (PANDEO NORMAL AL PLANO DEL RETICULADO)

3.4.1. Si la barra comprimida de longitud s y solicitada por un esfuerzo N cruza en su punto medio con otra barra traccionada de longitud s_t y solicitada por el esfuerzo N_t (figura 5 a), y los extremos de ambas barras no pueden desplazarse normalmente al plano que las contiene (plano del reticulado), es necesario conocer la longitud de pandeo s_K para comprobación del mismo normalmente a aquel plano. Esta longitud nunca debe ser menor que $0,5 s$. En el punto de cruce hay que distinguir si las dos barras atraviesan conservando íntegros sus momentos de inercia, o si esta hipótesis sólo es cierta para una de ellas, mientras la otra puede considerarse como articulada en aquel punto. Independientemente de ello, las dos barras deben unirse en el cruce directamente o por intermedio de una cartela. A tal efecto, las ba-

rras continuas han de unirse en el punto de cruce, por lo menos con el cuarto de los remaches necesarios para el enlace de nudo de la barra comprimida, o con la sección de soldadura equivalente. En los postes de celosía de líneas de alta tensión se pueden utilizar, por excepción, tornillos para la unión entre sí de dos diagonales cruzadas; en este caso deben asegurarse las tuercas en forma especial; por ejemplo, mediante arandelas elásticas.

a

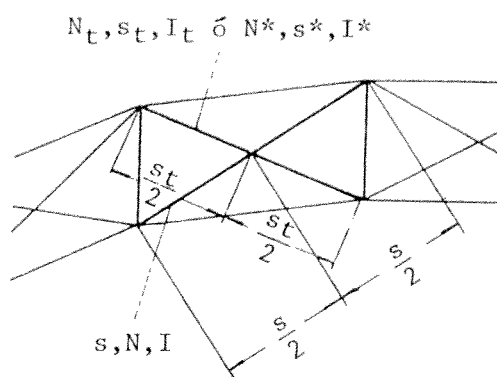


Figura 5

3.4.2. Si las dos barras se cruzan conservando íntegros sus momentos de inercía (figura 5 b), se tomará como longitud de pandeo de la barra comprimida la siguiente:

$$s_K = s \sqrt{1 - \frac{N_t \cdot s}{N \cdot s_t} \left(0,75 + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_t}{s_t^2 \cdot \gamma_K \cdot N_t} \right)}$$

Sin embargo, no se considerará una longitud de pandeo menor que $0,5 \cdot s$, aunque la expresión anterior dé un valor inferior.

3.4.3. Si en vez de la tracción N_t , que actúa como elemento rigidizador, se presenta una compresión N^* (figura 5 c), la longitud de pandeo a considerar es mayor y viene dada por:

$$s_K = s \sqrt{1 + \frac{N^* \cdot s}{N \cdot s^*} \left(1 - \frac{\pi^2 \cdot \chi \cdot E \cdot I^*}{s^{*2} \cdot N^* \cdot \gamma_K} \right)}$$

Sin embargo, la longitud de pandeo no debe ser menor que $s_K = 0,5 \cdot s$, aún cuando la fórmula anterior conduzca a un valor más pequeño. Asimismo, tam-

poco la barra de esfuerzo N^* puede calcularse con un valor de la longitud de pandeo menor que $s_K = 0,5.s^*$. El coeficiente de minoración λ , en el caso de pandeo, en el campo plástico, hay que tomarlo para:

$$\lambda = \frac{s^*}{i^*}$$

y el tipo de acero considerado de la tabla 3.

3.4.4. Si la barra traccionada está articulada en el punto de cruce en tanto que la barra comprimida es continua (figura 5 d), se tomará como longitud de pandeo de ésta:

$$s_K = s \sqrt{1 - 0,75 \frac{N_t \cdot s}{N \cdot s_t}}$$

con la limitación de no considerarla inferior a $0,5 \cdot s$.

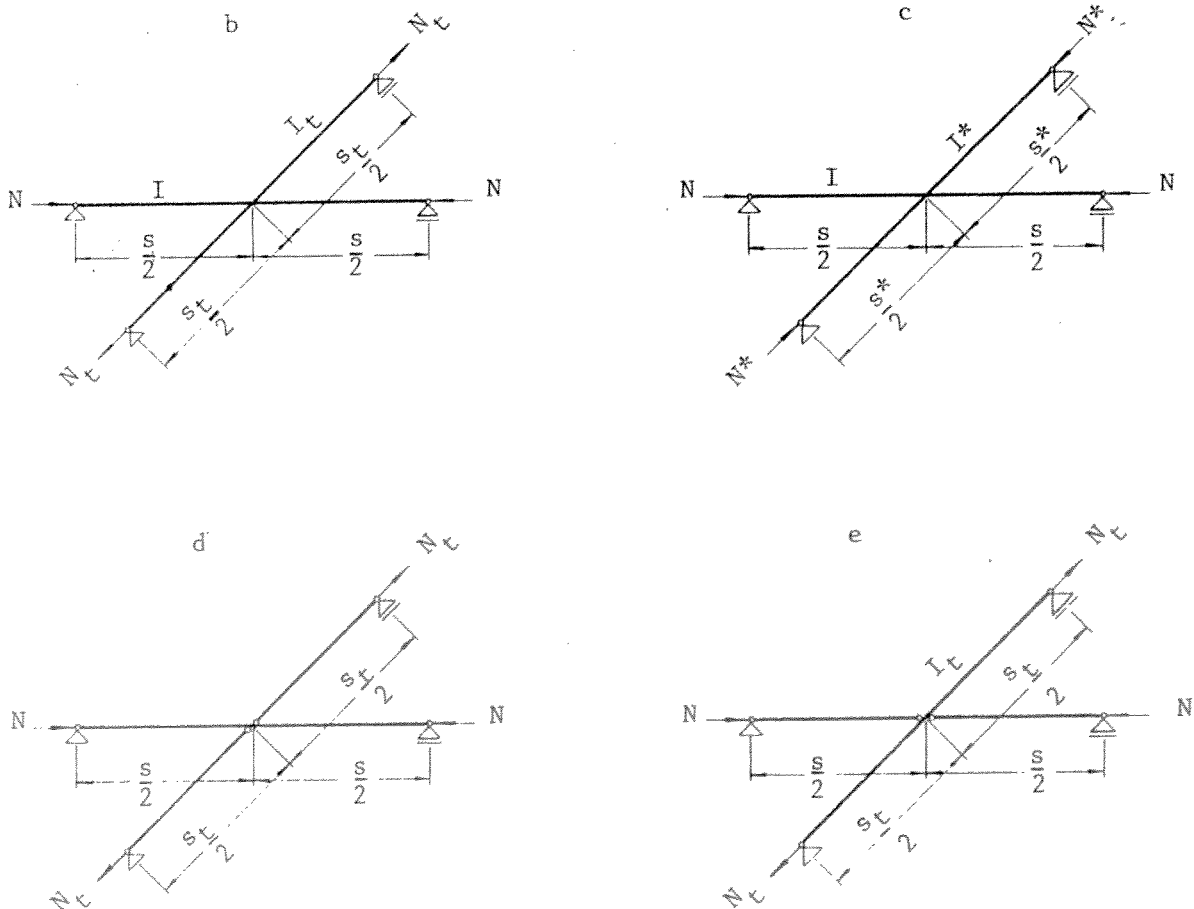


Figura 5

3.4.5. Si, en cambio, la barra traccionada cruza con continuidad y la comprimida está articulada en el cruce (figura 5 e) y se tiene que

$$\frac{N_t \cdot s}{N \cdot s_t} \geq 1$$

se dimensionará la barra comprimida para una longitud de pandeo $s_K = 0,5 s$. Si, por el contrario, se tiene que

$$\frac{N_t \cdot s}{N \cdot s_t} < 1$$

se tomará $s_K = 0,5 s$ sólo cuando se compruebe además que la rigidez a flexión de la barra traccionada en dirección normal al plano del reticulado cumple la condición:

$$E \cdot I_t \geq \gamma_K \frac{N \cdot s_t^3}{12 s} \left(1 - \frac{N_t \cdot s}{N \cdot s_t} \right)$$

Como valor del coeficiente de seguridad γ_K hay que tomar el que corresponda a la esbeltez de la barra comprimida. Puede calcularse haciendo

$$\gamma_K = \rho \cdot \gamma$$

siendo:

γ el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura;

ρ un valor que debe tomarse de tabla 3.

3.4.6. Si ambas barras están solicitadas a compresión (figura 5 f) puede utilizarse como longitud de pandeo de la barra articulada en el cruce $s_K = 0,5s$, sólo cuando se compruebe además que la rigidez a flexión de la barra continua en dirección normal al plano del reticulado satisface la condición:

$$E \cdot I^* \geq \gamma_K \frac{N \cdot s^{*3}}{12 s} \left(1 + 1,21 \frac{N^* \cdot s}{N \cdot s^*} \right)$$

Debe además realizarse, para la barra continua, la verificación establecida en el artículo 2.2.4.1. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", con una longitud de pandeo para la barra:

$$s_K^* = s^* \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{12} \cdot \frac{N \cdot s^*}{N^* \cdot s}}$$

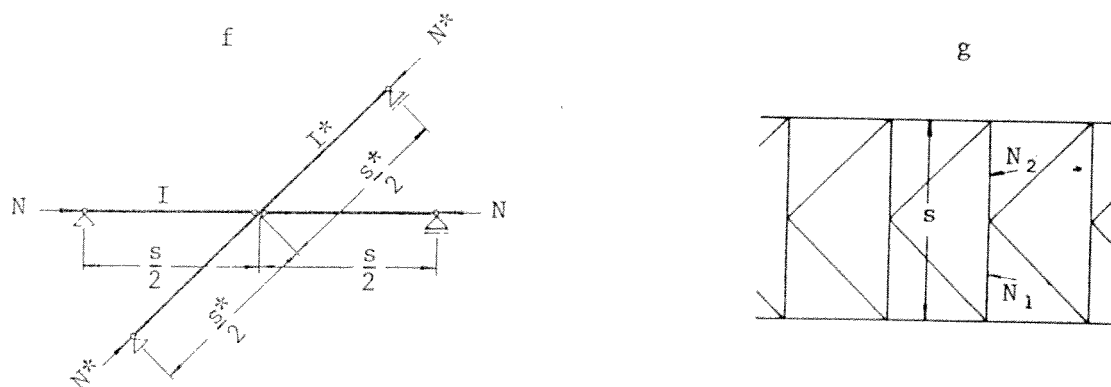


Figura 5

3.4.7. Si la barra está firmemente inmovilizada en sus extremos y actúa en una de sus dos mitades un esfuerzo de compresión N_2 y en la otra un esfuerzo axial $|N_1| \leq N_2$ (figura 5 g), debe calcularse la barra al pandeo perpendicularmente al plano de la celosía para la fuerza de compresión N_2 y una longitud de pandeo $s_K = \beta s$, donde β se obtiene de la línea 1 de la tabla 7 (N_1 se considera negativa si es de tracción). Si N_1 es un esfuerzo de tracción y $|N_1| \geq N_2$, debe tomarse $\beta = 0,5$.

3.4.8. En los postes de celosía de líneas de alta tensión se puede tomar, por excepción para el dimensionado de las diagonales, una longitud de pandeo equivalente $s_K = 0,9 s$.

3.4.9. Si la barra está constituida por un solo angular, y no se ha considerado en el dimensionado la excentricidad de la sollicitación (artículo 2.4.7. del Reglamento CIRSOC 302), hay que tomar como valor de la esbeltez la relación entre la longitud de pandeo, determinada según los artículos 3.4.2. a 3.4.8. y el radio de giro mínimo $i_{\min}$ de la sección del angular.

CAPITULO 4. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.2.4. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

4.1. GENERALIDADES

4.1.1. El comportamiento resistente de una barra comprimida axilmente puede estar caracterizado por la aparición de diversas deformaciones. Entre estas deformaciones están las que corresponden al pandeo por flexión, pandeo por torsión, pandeo por flexotorsión y pandeo por abollamiento de las paredes delgadas.

4.1.2. En las barras rectas comprimidas axilmente y en las piezas prismáticas solicitadas únicamente por esfuerzos axiles y que sólo experimenten un pandeo por flexión, hay que distinguir, según las hipótesis establecidas para el cálculo, tres valores teóricos diferentes de la compresión crítica:

- La carga crítica ideal (Euler), F_{Ki} , deducida bajo la hipótesis de una validez ilimitada de la ley de Hooke, en unión de otras suposiciones igualmente ideales (barra perfectamente recta, compresión exactamente centrada, isotropía perfecta de material).
- La carga crítica usual (Engesser) F_K , para cuya obtención se prescinde de la validez ilimitada de la ley de Hooke, manteniendo, sin embargo, las otras hipótesis simplificadoras.
- La carga crítica real F_{Kr} , para cuya determinación se prescinde también de las otras hipótesis teóricas de tipo geométrico (barra perfectamente recta y compresión exactamente centrada).

La dificultad de la determinación teórica y la complejidad del trabajo de cálculo necesario crecen en el orden indicado; por esta razón, en la construcción metálica se utilizarán para el dimensionado: la carga crítica real, sólo en los casos más sencillos; la de Engesser, en general, y la teórica de Euler en los casos de mayor dificultad.

4.1.3. Si se utiliza para el dimensionado de una barra recta comprimida axilmente la carga crítica real F_{Kr} , hay que efectuar la comprobación:

$$F \leq \frac{F_{Kr}}{\gamma_{Kr}}$$

siendo:

F la mayor carga que actúa sobre la pieza;

γ_{Kr} el coeficiente de seguridad real.

Si se utilizan las cargas críticas de Engesser, F_K o de Euler, F_{Ki} , habrá de comprobarse que:

$$F \leq \frac{F_K}{\gamma_K} \quad \text{ó} \quad F \leq \frac{F_{Ki}}{\gamma_{Ki}}$$

siendo:

γ_K y γ_{Ki} los coeficientes de seguridad usual (de Engesser) e ideal.

4.1.4. Los coeficientes de seguridad γ_{Kr} , γ_K y γ_{Ki} deben estar comprendidos dentro de los límites que, por razones de seguridad y de economía, así como por los de experiencia y conocimiento teórico, se establecen, y tanto mayores han de fijarse cuanto más se aparten de la realidad las hipótesis fundamentales, simplificadoras e idealizadoras, admitidas para el cálculo.

Para el coeficiente de seguridad real γ_{Kr} , se tomará un valor $\gamma_{Kr} = \gamma$, siendo γ el coeficiente de seguridad de cálculo de la estructura según el reglamento correspondiente (en el caso de edificios, Reglamento CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios"), siempre que para la determinación de la carga crítica se haya tenido en cuenta la máxima excentricidad posible "prácticamente inevitable" de la sollicitación. El coeficiente de seguridad de Engesser γ_K depende de la máxima tensión de compresión desarrollada bajo la acción de F_K ; en las piezas muy esbeltas, cuya carga crítica es tan pequeña que con ella no se sobrepasa el límite de proporcionalidad σ_E del acero, coincide F_K con la carga crítica ideal F_{Ki} y por lo tanto se identifica con el coeficiente de seguridad γ_{Ki} . El coeficiente de seguridad γ_{Ki} no debe ser menor que $\frac{5}{3} \gamma$, siendo γ el coeficiente de seguridad de cálculo de la estructura según el reglamento correspondiente. Como este valor es mayor que el coeficiente de seguridad real γ_{Kr} , la condición

$$F \leq \frac{F_{Ki}}{\gamma_{Ki}}$$

puede llevarnos en las barras esbeltas a una carga admisible menor que la dada por

$$F \leq \frac{F_{Kr}}{\gamma_{Kr}}$$

Por lo tanto, se debe efectuar la doble comprobación:

$$F \leq \frac{F_{Kr}}{\gamma_{Kr}} \quad y \quad F \leq \frac{F_{Ki}}{\gamma_{Ki}}$$

4.2. COEFICIENTE DE PANDEO

4.2.1. Muchos problemas de pandeo pueden reducirse, mediante la introducción de la longitud de pandeo s_K , a la determinación de la carga crítica de una barra recta biarticulada de sección constante y esfuerzo axial constante N . Es, por lo tanto, conveniente tratar armónicamente el cálculo de pandeo en estos casos normales. En vez de la comprobación indicada en el artículo 4.1.3. se puede, en ellos, bajo los supuestos de constancia de la sección de la barra y de la sollicitación axial, verificar sencillamente

$$\frac{N}{A} \leq \sigma_c \text{ adm}$$

siendo:

$\sigma_c \text{ adm}$ la tensión admisible al pandeo.

Para no tener que establecer tablas especiales de los valores de $\sigma_c \text{ adm}$ para cada valor del coeficiente de seguridad γ de cálculo de la estructura (Reglamento CIRSOC 301 en el caso de edificios), con el objeto, además, de facilitar el cálculo numérico y para poder disponer de una fórmula sencilla para la verificación de la barra recta solicitada a compresión axial, se escribe la condición $\frac{N}{A} \leq \sigma_c \text{ adm}$ en la forma:

$$\frac{\omega \cdot N}{A} \leq \sigma_{\text{adm}}$$

siendo:

$\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_F}{\gamma}$ la tensión admisible;

σ_F la tensión de fluencia;

γ el coeficiente de seguridad establecido de acuerdo con el reglamento correspondiente (CIRSOC 301 para el caso de edificios), para el acero empleado;

$\omega = \frac{\sigma_{\text{adm}}}{\sigma_c \text{ adm}}$ el coeficiente de pandeo.

Los coeficientes de pandeo dependen de la calidad del material y de la esbeltez de la barra, y vienen dados en las tablas 1 a 6 del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero".

4.2.2. Para la construcción de estas tablas, y a fin de conseguir una ley de variación racional de los valores de σ_c adm y, por lo tanto, también del coeficiente de pandeo ω , se tomó como norma la doble comprobación:

$$\frac{N}{A} \leq \frac{\sigma_{Kr}}{\gamma_{Kr}} \qquad \frac{N}{A} \leq \frac{\sigma_{Ki}}{\gamma_{Ki}}$$

indicada en el artículo 4.1.4., calculando las tensiones críticas ideales

$$\sigma_{Ki} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

con el valor $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ ($2\,100\,000\text{ kgf/cm}^2$) y determinando las tensiones críticas reales, sobre la base de las siguientes suposiciones:

- I La sección constante de la barra tiene la forma representada en la figura 6 a, que es muy desfavorable para su capacidad resistente, suponiendo que el punto de paso de la recta de acción de la fuerza de compresión sea el indicado en la misma.
- II La compresión actúa en los extremos articulados de la barra y conserva su dirección constante durante el pandeo. El punto de paso de su línea de acción está contenido en el eje de simetría de la sección y a la distancia e del centro de gravedad. La magnitud e representa la excentricidad, no prevista, pero prácticamente "inevitable", de la compresión y que, en general, se compone de un sumando dependiente y otro independiente de la longitud de la barra. Se supone arbitrariamente que e está ligado con el radio de giro i de la sección y con la longitud teórica de la pieza s por la ecuación:

$$e = \frac{i}{20} + \frac{s}{500}, \text{ con lo cual } \frac{e}{i} = 0,05 + \frac{\lambda}{500}$$

- III Las hipótesis de la teoría de la flexión son válidas también fuera de los límites de validez de la Ley de Hooke. El acero obedece en este caso a una ley de tensiones - deformaciones, idealmente elástica e idealmente plástica (figura 6 b), en la que $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ ($2\,100\,000\text{ kgf/cm}^2$) y donde la tensión de fluencia es $\sigma_F^* = 0,95\sigma_F$, donde σ_F es la tensión de fluencia del acero empleado según lo establece la tabla 1 del Reglamento CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios".

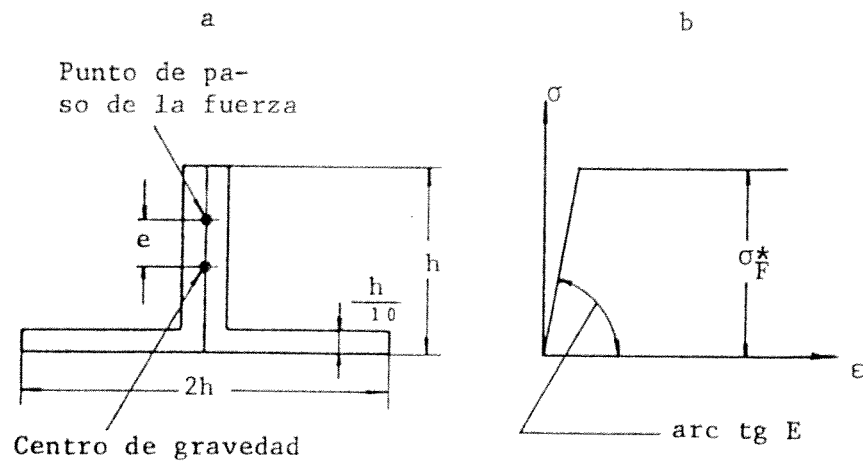


Figura 6

La elástica puede suponerse aproximadamente constituida por una semionda senoidal.

- IV En vista de las hipótesis pesimistas enunciadas en los párrafos I a III, se tomará como coeficiente de seguridad $\gamma_{Kr} = \gamma$, siendo γ el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura de acuerdo con el reglamento correspondiente (CIRSOC 301, para el caso de edificios).

De acuerdo con lo establecido en los párrafos I a IV podrá deducirse la tensión crítica real $\sigma_{Kr} = N_{Kr}/A$ correspondiente a la esbeltez λ y a la tensión de fluencia σ_F del acero según lo establece la tabla 1 del Reglamento CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios" con la ecuación:

$$\lambda^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{Kr}} \left[1 - \frac{\theta \sigma_{Kr}}{\sigma_F^* - \sigma_{Kr}} + 0,25 \left(\frac{\theta \sigma_{Kr}}{\sigma_F^* - \sigma_{Kr}} \right)^2 - 0,005 \left(\frac{\theta \sigma_{Kr}}{\sigma_F^* - \sigma_{Kr}} \right)^3 \right]$$

siendo:

$$\theta = 2,317 \left(0,05 + \frac{\lambda}{500} \right)$$

$$\sigma_F^* = 0,95 \sigma_F$$

En la figura 7 y en la tabla 1 se dan las tensiones críticas ideales (de Euler) $\sigma_{Ki} = \frac{N_{Ki}}{A}$ y las reales $\sigma_{Kr} = \frac{N_{Kr}}{A}$ en función de λ y para distintos aceros.

Tabla 1

λ	$\sigma_{Kr} \text{ (N/mm}^2\text{)}$						$\sigma_{Ki} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
	F-20	F-22	F-24	F-26	F-30	F-36	
20	167,5	184,0	200,6	217,1	250,0	299,2	
25	164,4	180,5	196,7	212,7	244,7	292,4	
30	161,1	176,8	192,4	208,0	238,9	284,8	
35	157,6	172,8	187,9	202,9	232,6	276,4	
40	153,8	168,5	183,0	197,4	225,7	267,3	
45	149,9	163,9	177,8	191,5	218,4	257,4	
50	145,7	159,1	172,3	185,3	210,5	246,9	
55	141,4	154,1	166,5	178,7	202,3	235,7	
60	136,9	148,8	160,5	171,8	193,7	224,1	
65	132,2	143,4	154,3	164,8	184,8	212,2	
70	127,4	137,8	147,9	157,6	175,7	200,3	423,0
75	122,5	132,2	141,4	150,3	166,7	188,4	368,5
80	117,6	126,5	135,0	143,0	157,7	176,9	323,8
85	112,7	120,9	128,6	135,8	148,9	165,7	286,9
90	107,8	115,3	122,2	128,7	140,4	155,1	255,9
95	103,0	109,8	116,1	121,9	132,3	145,1	229,7
100	98,3	104,5	110,1	115,3	124,5	135,7	207,3
105	93,7	99,3	104,4	109,0	117,2	127,0	188,0
110	89,3	94,3	98,9	103,1	110,3	118,9	171,3
115	85,0	89,6	93,7	97,4	103,8	111,4	156,7
120	81,0	85,1	88,8	92,1	97,8	104,5	143,9
125	77,1	80,8	84,1	87,1	92,2	98,1	132,6
130	73,4	76,8	79,8	82,4	87,0	92,2	122,6
135							113,7
140							105,7
145							98,6
150							92,1

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$$

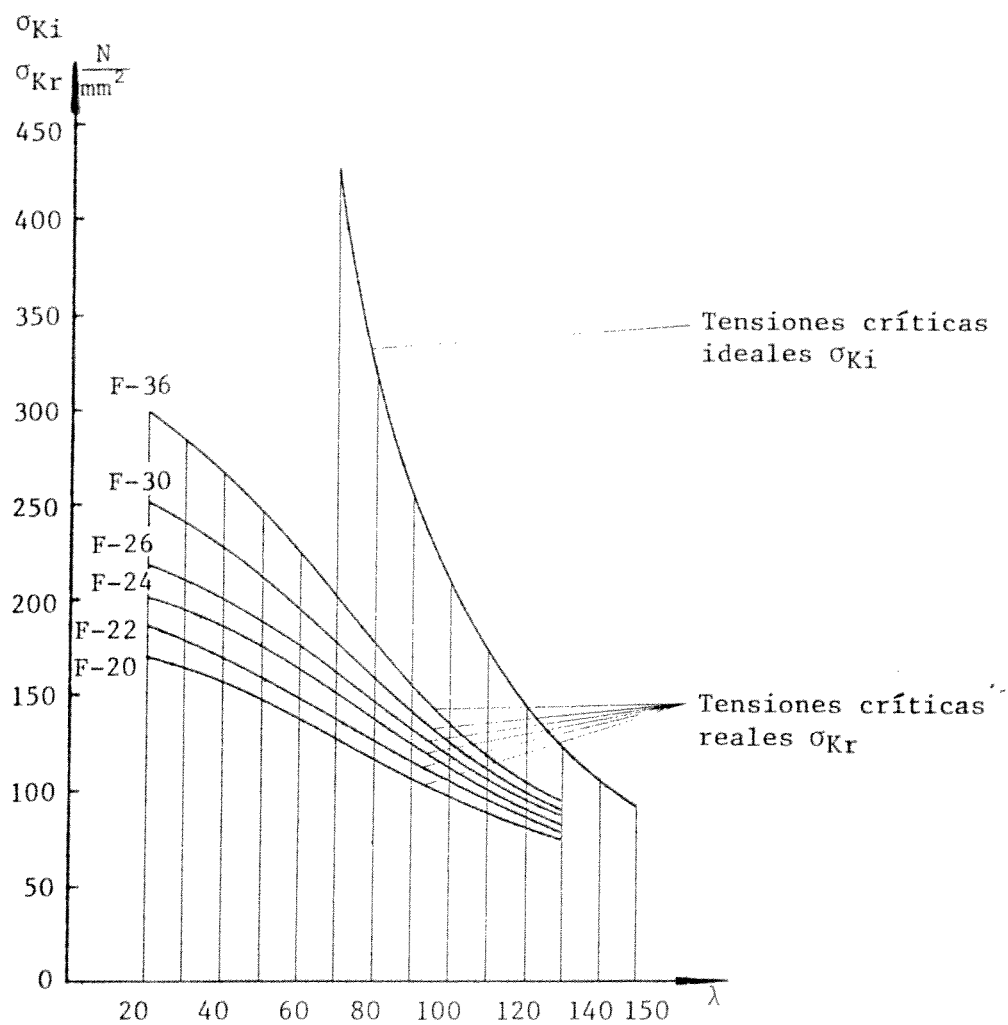


Figura 7

Dividiendo σ_{Ki} por γ_{Ki} y σ_{Kr} por γ_{Kr} , el menor entre esos dos cocientes es $\sigma_{c adm}$. Para obtener el coeficiente ω de pandeo deben calcularse

$$\omega_1 = \frac{\sigma_{adm}}{\frac{\sigma_{Ki}}{\gamma_{Ki}}} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{Ki}} \cdot \frac{5}{3} \gamma = \frac{5}{3} \cdot \frac{\sigma_F}{\sigma_{Ki}}$$

$$\omega_2 = \frac{\sigma_{adm}}{\frac{\sigma_{Kr}}{\gamma_{Kr}}} = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{Kr}} \gamma = \frac{\sigma_F}{\sigma_{Kr}}$$

El mayor de los dos es, en cada caso, ω .

4.3. LA CARGA CRÍTICA F_K Y EL COEFICIENTE DE SEGURIDAD γ_K DE ENGESSER

4.3.1. Si en la determinación de la tensión crítica se prescinde de la hipótesis de la validez ilimitada de la ley de Hooke y en vez de ella, conservando todas las demás restantes hipótesis teóricas, se utiliza el diagrama tensiones-deformaciones del acero, se obtiene en lugar de la tensión crítica de Euler, la de Engesser (1ª. teoría, o del módulo tangente).

$$\sigma_K = \frac{\pi^2 \cdot E_t}{\lambda^2}$$

siendo:

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad \text{el módulo tangente;}$$

Si σ_E es el límite de proporcionalidad y de elasticidad del acero, en el dominio $\sigma_K \leq \sigma_E$ (dominio elástico), se tiene $E_t = E$ y por lo tanto $\sigma_K = \sigma_{Ki}$, mientras que en el dominio anelástico, $\sigma_E < \sigma_K \leq \sigma_F$, el módulo tangente E_t es menor que el de elasticidad E y, por consiguiente la tensión crítica de Engesser menor que la ideal de Euler σ_{Ki} . Si se divide σ_K por el coeficiente de seguridad de Engesser γ_K se obtiene la tensión admisible al pandeo $\sigma_{c \text{ adm}}$. Y puesto que, según el artículo 2.2.4. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", el valor $\sigma_{c \text{ adm}} = \frac{\sigma_{adm}}{\omega}$ debe considerarse obligatorio, puede incluirse γ_K en aquel reglamento a través de la relación

$$\gamma_K = \omega \frac{\sigma_K}{\sigma_{adm}} = \omega \frac{\sigma_K}{\sigma_F} \gamma$$

siendo:

- ω el coeficiente de pandeo correspondiente, que se obtiene de las tablas 1 a 6 del Reglamento en función de la esbeltez λ .
- $\sigma_{adm} = \frac{\sigma_F}{\gamma}$ la tensión admisible, donde σ_F es la tensión de fluencia del acero y γ el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura, ambos establecidos de acuerdo con el reglamento correspondiente (en el caso de edificios, CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios").

4.3.2. A fin de disponer de una base general para calcular la tensión crítica de Engesser σ_K , para cualquier calidad de acero, se supone que la tensión límite de proporcionalidad es $\sigma_E = 0,8 \sigma_F$ y para $\sigma_E < \sigma < \sigma_F$, la relación

entre tensiones y deformaciones está dada por la ecuación (figura 8).

$$\frac{\sigma - \sigma_E}{\sigma_F - \sigma_E} = \text{th} \frac{\epsilon E - \sigma_E}{\sigma_F - \sigma_E}$$

o, en forma explícita

$$\sigma = \sigma_F \left[0,8 + 0,2 \text{ th} \left(5 \frac{\epsilon E}{\sigma_F} - 4 \right) \right]$$

En esta fórmula debe ser $\epsilon \geq \frac{0,8 \sigma_F}{E}$

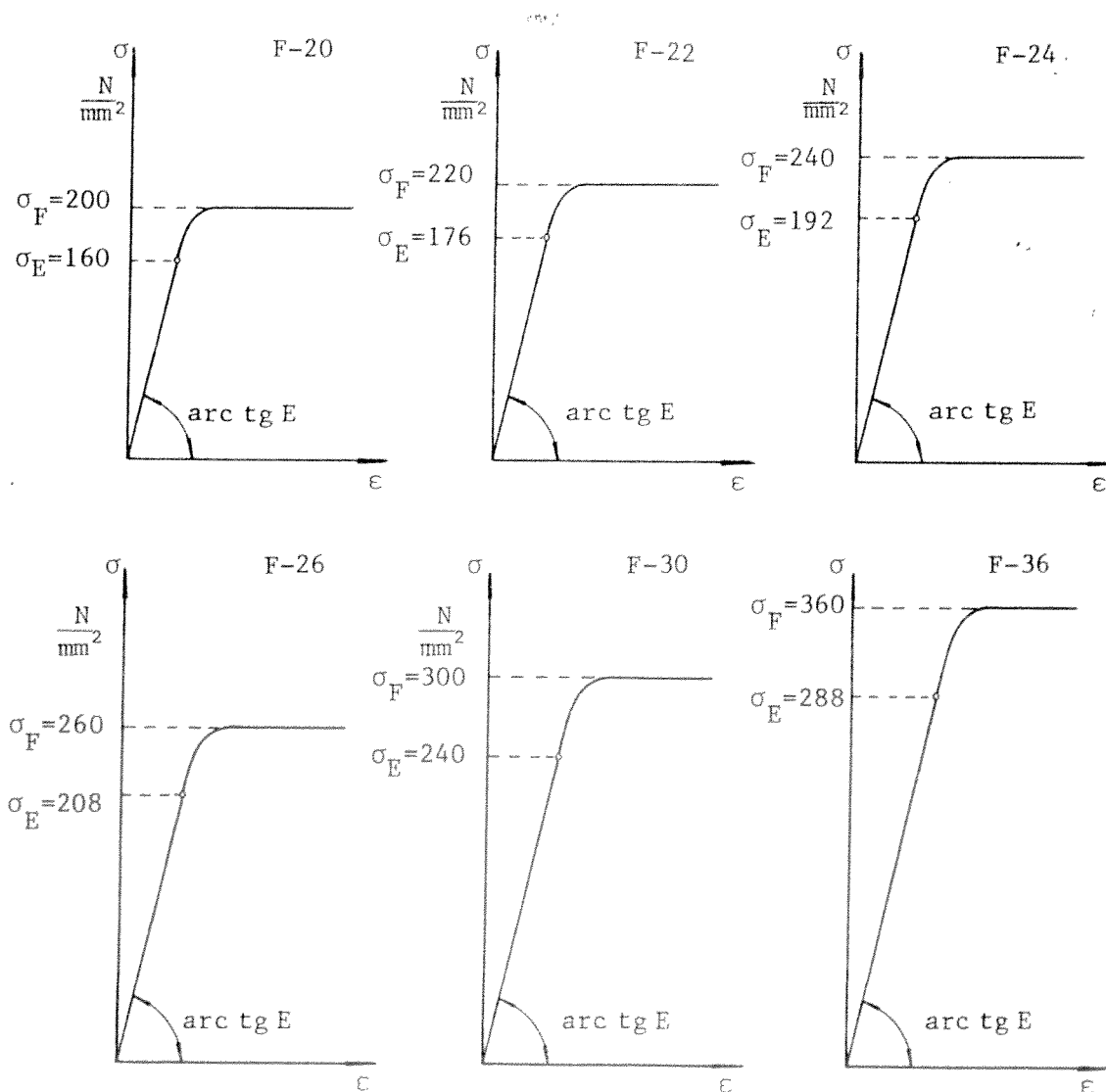


Figura 8

Para $\epsilon = \frac{0,8 \sigma_F}{E}$, se obtiene $\sigma = 0,8 \sigma_F$ y para $\epsilon = \infty$, $\sigma = \sigma_F$. Como valor del módulo de elasticidad se tomará $E = 210\,000 \frac{N}{mm^2}$ ($2\,100\,000 \text{ kgf/cm}^2$) y como valores de σ_F se tomarán los indicados en la tabla 1 del Reglamento CIRSOC 301 y la figura 8.

El módulo tangente resulta,

$$E_t = E \left[-25 \left(\frac{\sigma}{\sigma_F} \right)^2 + 40 \frac{\sigma}{\sigma_F} - 15 \right]$$

para $0,8 \sigma_F \leq \sigma \leq \sigma_F$.

El límite entre los dominios elástico y anelástico corresponde a una esbeltez

$$\lambda = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{5 E}{\sigma_F}}$$

cuyos valores para distintos aceros se consignan en la tabla 2

Tabla 2

Acero	λ límite
F-20	113,815
F-22	108,518
F-24	103,898
F-26	99,822
F-30	92,930
F-36	84,833

La tensión crítica de Engesser es

$$\sigma_K = \sigma_F \left[0,8 - \frac{\lambda^2 \sigma_F}{50 \pi^2 E} + \sqrt{\left(0,8 - \frac{\lambda^2 \sigma_F}{50 \pi^2 E} \right)^2 - 0,6} \right]$$

En la tabla 3 se dan los valores de σ_K y de $\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma} = \frac{\omega \sigma_K}{\sigma_F}$ en función de λ .

En el artículo 6.2., tabla 11 y figura 20 del Reglamento CIRSOC 302 se dan los valores de la tensión crítica σ_K (allí denominada tensión reducida de comparación σ_{VK}) en función de la tensión crítica ideal $\sigma_{Ki} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ (allí denominada tensión ideal de comparación σ_{VKi}).

Tabla 3 a. Valores para el acero F-20

λ	$\sigma_{Ki} (N/mm^2)$	$\sigma_K (N/mm^2)$	$\rho = \frac{Y_K}{Y}$	χ
20	5 181,5	199,2	1,19	0,038
25	3 316,2	198,8	1,21	0,060
30	2 302,9	198,2	1,23	0,086
35	1 691,9	197,6	1,25	0,117
40	1 295,4	196,8	1,28	0,152
45	1 023,5	196,0	1,31	0,191
50	829,0	195,0	1,34	0,235
55	685,2	193,9	1,37	0,283
60	575,7	192,6	1,41	0,335
65	490,6	191,2	1,45	0,390
70	423,0	189,7	1,49	0,448
75	368,5	188,0	1,53	0,510
80	323,8	186,1	1,58	0,575
85	286,9	184,0	1,63	0,641
90	255,9	181,6	1,68	0,710
95	229,7	178,8	1,74	0,779
100	207,3	175,6	1,79	0,847
105	188,0	171,8	1,83	0,914
110	171,3	166,6	1,87	0,973
113,815	160,0	160,0	1,86	1,000
115	156,7		1,84	
120	143,9		1,78	
125	132,6		1,72	
130	122,6		1,67	
135	113,7		1,67	
140	105,7		1,67	
145	98,6		1,67	
150	92,1		1,67	

Tabla 3 b. Valores para el acero F-22

λ	$\sigma_{Ki} (N/mm^2)$	$\sigma_K (N/mm^2)$	$\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma}$	χ
20	5 181,5	219,1	1,19	0,042
25	3 316,2	218,5	1,21	0,066
30	2 302,9	217,9	1,23	0,095
35	1 691,9	217,1	1,26	0,128
40	1 295,4	216,2	1,28	0,167
45	1 023,5	215,1	1,31	0,210
50	829,0	213,9	1,34	0,258
55	685,2	212,5	1,38	0,310
60	575,7	211,0	1,42	0,367
65	490,6	209,3	1,46	0,427
70	423,0	207,4	1,51	0,490
75	368,5	205,3	1,55	0,557
80	323,8	202,9	1,60	0,627
85	286,9	200,2	1,66	0,698
90	255,9	197,1	1,71	0,770
95	229,7	193,5	1,76	0,842
100	207,3	189,0	1,81	0,912
105	188,0	183,1	1,84	0,974
108,518	176,0	176,0	1,84	1,000
110	171,3		1,82	
115	156,7		1,75	
120	143,9		1,69	
125	132,6		1,67	
130	122,6		1,67	
135	113,7		1,67	
140	105,7		1,67	
145	98,6		1,67	
150	92,1		1,67	

Tabla 3 c. Valores para el acero F-24

λ	$\sigma_{Ki} (N/mm^2)$	$\sigma_K (N/mm^2)$	$\rho = \frac{Y_K}{Y}$	χ
20	5 181,5	238,9	1,19	0,046
25	3 316,2	238,2	1,21	0,072
30	2 302,9	237,5	1,23	0,103
35	1 691,9	236,5	1,26	0,140
40	1 295,4	235,4	1,29	0,182
45	1 023,5	234,2	1,32	0,229
50	829,0	232,7	1,35	0,281
55	685,2	231,1	1,39	0,337
60	575,7	229,2	1,43	0,398
65	490,6	227,2	1,47	0,463
70	423,0	224,9	1,52	0,532
75	368,5	222,2	1,57	0,603
80	323,8	219,3	1,62	0,677
85	286,9	215,9	1,68	0,753
90	255,9	211,9	1,73	0,828
95	229,7	207,1	1,78	0,902
100	207,3	200,6	1,82	0,968
103,898	192,0	192,0	1,82	1,000
105	188,0		1,80	
110	171,3		1,73	
115	156,7		1,67	
120	143,9		1,67	
125	132,6		1,67	
130	122,6		1,67	
135	113,7		1,67	
140	105,7		1,67	
145	98,6		1,67	
150	92,1		1,67	

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$$

Tabla 3 d. Valores para el acero F-26

λ	$\sigma_{Ki} (N/mm^2)$	$\sigma_K (N/mm^2)$	$\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma}$	χ
20	5 181,5	258,7	1,19	0,050
25	3 316,2	257,9	1,21	0,078
30	2 302,9	257,0	1,24	0,112
35	1 691,9	255,9	1,26	0,151
40	1 295,4	254,6	1,29	0,197
45	1 023,5	253,1	1,32	0,247
50	829,0	251,4	1,36	0,303
55	685,2	249,5	1,40	0,364
60	575,7	247,3	1,44	0,430
65	490,6	244,8	1,49	0,499
70	423,0	242,0	1,54	0,572
75	368,5	238,8	1,59	0,648
80	323,8	235,2	1,65	0,726
85	286,9	231,0	1,70	0,805
90	255,9	225,8	1,75	0,883
95	229,7	219,1	1,80	0,954
99,822	208,0	208,0	1,80	1,000
100	207,3		1,80	
105	188,0		1,72	
110	171,3		1,67	
115	156,7		1,67	
120	143,9		1,67	
125	132,6		1,67	
130	122,6		1,67	
135	113,7		1,67	
140	105,7		1,67	
145	98,6		1,67	
150	92,1		1,67	

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$$

Tabla 3 e. Valores para el acero F-30

λ	$\sigma_{Ki}(\text{N/mm}^2)$	$\sigma_K(\text{N/mm}^2)$	$\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma}$	χ
20	5 181,5	298,2	1,19	0,058
25	3 316,2	297,2	1,22	0,090
30	2 302,9	296,0	1,24	0,129
35	1 691,9	294,5	1,27	0,174
40	1 295,4	292,8	1,30	0,226
45	1 023,5	290,8	1,33	0,284
50	829,0	288,5	1,37	0,348
55	685,2	285,8	1,41	0,417
60	575,7	282,8	1,46	0,491
65	490,6	279,4	1,51	0,569
70	423,0	275,4	1,57	0,651
75	368,5	270,9	1,63	0,735
80	323,8	265,5	1,68	0,820
85	286,9	258,8	1,74	0,902
90	255,9	249,5	1,78	0,975
92,930	240,0	240,0	1,77	1,000
95	229,7		1,74	
100	207,3		1,67	
105	188,0		1,67	
110	171,3		1,67	
115	156,7		1,67	
120	143,9		1,67	
125	132,6		1,67	
130	122,6		1,67	
135	113,7		1,67	
140	105,7		1,67	
145	98,6		1,67	
150	92,1		1,67	

$$1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$$

Tabla 3 f. Valores para el acero F-36

λ	$\sigma_{Ki} (N/mm^2)$	$\sigma_K (N/mm^2)$	$\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma}$	χ
20	5 181,5	357,5	1,20	0,069
25	3 316,2	356,0	1,22	0,107
30	2 302,9	354,2	1,24	0,154
35	1 691,9	352,1	1,27	0,208
40	1 295,4	349,5	1,31	0,270
45	1 023,5	346,6	1,35	0,339
50	829,0	343,1	1,39	0,414
55	685,2	339,2	1,44	0,495
60	575,7	334,6	1,49	0,581
65	490,6	329,3	1,55	0,671
70	423,0	323,0	1,61	0,764
75	368,5	315,3	1,67	0,856
80	323,8	305,3	1,73	0,943
84,833	288,0	288,0	1,73	1,000
85	286,9		1,73	
90	255,9		1,67	
95	229,7		1,67	
100	207,3		1,67	
105	188,0		1,67	
110	171,3		1,67	
115	156,7		1,67	
120	143,9		1,67	
125	132,6		1,67	
130	122,6		1,67	
135	113,7		1,67	
140	105,7		1,67	
145	98,6		1,67	
150	92,1		1,67	

4.4. PANDEO POR FLEXOTORSION DE BARRAS COMPRIMIDAS AXILMENTE Y CUYA SECCION TIENE UN SOLO EJE DE SIMETRIA

4.4.1. En las barras de paredes delgadas solicitadas a compresión axial y en cuya sección abierta y con un solo eje de simetría, no coincida el centro de corte C con el centro de gravedad G (figura 9), puede producirse un pandeo por flexión fuera del plano de simetría acompañada de torsión (ver capítulo 2).

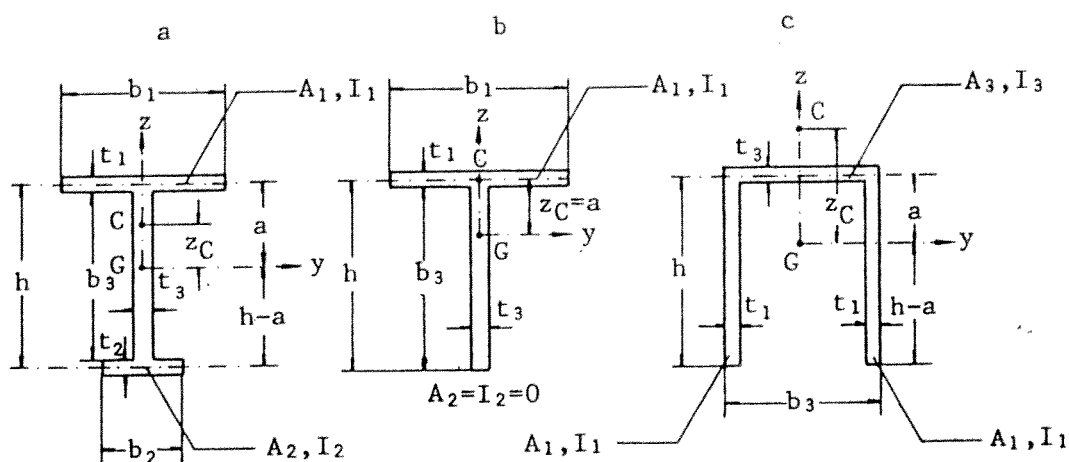


Figura 9

Puede comprobarse la seguridad frente a este modo de pandeo utilizando el procedimiento indicado en el artículo 2.2.4.1. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", si se considera en ellas una esbeltez ideal λ_{Vi} .

4.4.2. Esta esbeltez ideal puede calcularse, en las secciones con un solo eje, el z-z, de simetría con la fórmula:

$$\lambda_{Vi} = \frac{\beta \cdot s}{i_z} \sqrt{\frac{i_T^2 + i_C^2}{2 i_T^2}} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{4 i_T^2 [i_0^2 + 0,093 (\beta^2 / \beta_0^2 - 1) z_C^2]}{(i_T^2 + i_C^2)^2}} \right]$$

siendo:

$i_0 = \sqrt{i_y^2 + i_z^2}$ el radio de giro polar con relación al centro de gravedad;

$i_C = \sqrt{i_0^2 + z_C^2}$ el radio de giro polar con relación al centro de corte;

z_C la ordenada del centro de corte tomando como origen el centro de gravedad;

$$i_T = \sqrt{\frac{I_\omega (\beta \cdot s)^2 / (\beta_0 \cdot s_0)^2 + 0,039 (\beta \cdot s)^2 I_T}{I_z}}, \text{ el radio de torsión de la sección;}$$

I_T constante de torsión libre de la sección de la barra;

I_ω momento sectorial de inercia de la sección de la barra;

s la longitud teórica de la barra;

s_0 la distancia, de importancia en la torsión, medida en el plano entre los centros de gravedad de los grupos de remaches o cordones de soldadura de los extremos de la barra;

β el coeficiente de empotramiento a flexión;

β_0 el coeficiente de alabeo (ver artículo 4.4.2.2.).

4.4.2.1. En las secciones de la figura 9 pueden calcularse los valores z_C , I_ω , I_T con las fórmulas siguientes, para las figuras 9 a y b:

$$z_C = \frac{1}{I_z} \left[a \cdot I_1 - (h - a) I_2 \right]$$

$$I_\omega = \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot h^2}{I_1 + I_2}$$

$$I_T = \frac{1}{3} (b_1 \cdot t_1^3 + b_2 \cdot t_2^3 + b_3 \cdot t_3^3)$$

para la figura 9 c:

$$z_C = a + \frac{I_1}{I_z} \cdot h$$

$$I_\omega = \frac{h^2}{3} \cdot \frac{I_1^2 + 2 I_1 \cdot I_3}{I_z}$$

$$I_T = \frac{1}{3} (2 b_1 \cdot t_1^3 + b_3 \cdot t_3^3)$$

siendo:

I_1 , I_2 y I_3 los valores de los momentos de inercia con relación al eje de simetría z-z de las partes de las secciones de áreas A_1 , A_2 y A_3 respectivamente.

4.4.2.2. La fórmula dada en 4.4.2. para la esbeltez ideal corresponde, con $\beta = \beta_0 = 1$, a un apoyo de doble charnela de los dos extremos de la barra. En este caso quedan impedidos los giros y desplazamientos en su propio plano de las secciones extremas. Por el contrario, pueden girar estas seccio-

nes extremas libremente alrededor de cualquiera de los ejes y-y y z-z, y además pueden alabearse libremente, desplazándose sus puntos en la dirección del eje de la barra. Con $\beta = \beta_0 = 0,5$, corresponde a un empotramiento perfecto alrededor del eje z-z y a un alabeo impedido de las secciones extremas. Si las condiciones de vínculo de la barra corresponden a un empotramiento elástico de la sección extrema alrededor del eje z-z, se tendrá: $0,5 < \beta < 1$ y si corresponden a un alabeo de la misma, elásticamente impedido: $0,5 < \beta_0 < 1$. En los casos prácticos usuales se debe suponer que $0,5 < \beta < 1$ y $\beta_0 = 0,5$.

4.4.3. En las secciones con simetría doble o central hay que comprobar la barra al pandeo por torsión pura cuando $i_0 > i_T$. En este caso la fórmula de la esbeltez ideal, dada en el artículo 4.4.2., se transforma en

$$\lambda_{Vi} = \frac{\beta \cdot s}{i_z} \cdot \frac{i_0}{i_T}$$

4.5. BARRAS COMPRIMIDAS CON SECCION DE ALTURA VARIABLE

Las barras comprimidas con un esfuerzo normal constante a lo largo de la misma y cuya sección tiene un área aproximadamente constante, pero una altura de sección variable, ya se trate de barras con sección I o de barras compuestas (figura 10), pueden calcularse como barras con un momento de inercia constan-

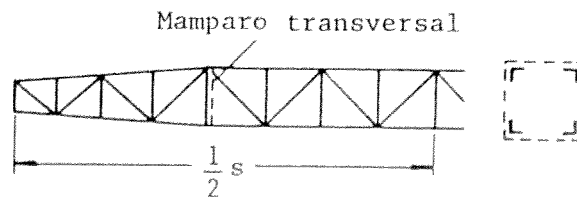


Figura 10

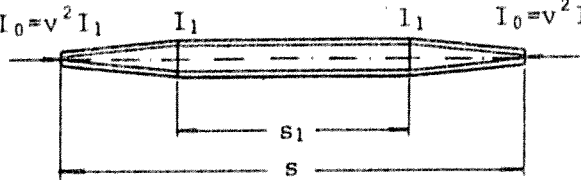
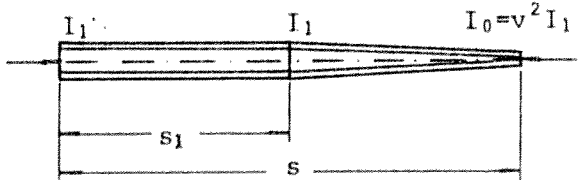
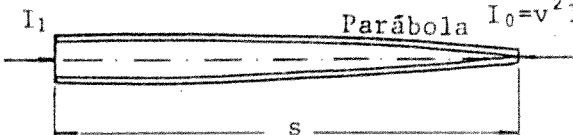
te $I = c \cdot \text{máx. } I$, en donde el valor de c se tomará de la tabla 4. En esta tabla se introduce la magnitud auxiliar,

$$v = \sqrt{\frac{I_0}{I_1}} = \sqrt{\frac{\text{mín. } I}{\text{máx. } I}}$$

y es válida solamente para piezas articuladas en las que $I_0 \geq 0,01 I_1$. Para las barras en que $s_1 \geq 0,8 s$, se tomará $c = 1$, y en las que s_1 esté compren-

dida entre 0,5 s y 0,8 s, se interpolará linealmente para obtener c. Otro procedimiento aproximado para la determinación de I se indica en el artículo 7.1.2. En las barras compuestas hay que tener en cuenta también las prescripciones del artículo 2.2.5. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero". En las barras simples de sección I, con área ligeramente variable, hay que sustituir A por su valor medio; las barras cuya sección transversal A varía rápidamente se calcularán según las indicaciones del artículo 4.7.

Tabla 4

 Para: $s_1 \leq 0,5 \cdot s$ y $0,1 \leq v \leq 1$ $c = (0,17 + 0,33 \cdot v + 0,5 \cdot \sqrt{v}) + \frac{s_1}{s} \cdot (0,62 + \sqrt{v} - 1,62 \cdot v)$	 Para: $0,1 \leq v \leq 1$ $c = 0,48 + 0,02 \cdot v + 0,5 \cdot \sqrt{v}$
 Para: $s_1 \leq 0,5 \cdot s$ y $0,1 \leq v \leq 1$ $c = (0,08 + 0,92 \cdot v) + \left(\frac{s_1}{s}\right)^2 \cdot (0,32 + 4 \cdot \sqrt{v} - 4,32 \cdot v)$	 Para: $0,1 \leq v \leq 1$ $c = 0,18 + 0,32 \cdot v + 0,5 \cdot \sqrt{v}$

4.6. BARRAS SOMETIDAS A COMPRESION AXIL VARIABLE

4.6.1. Si una barra de sección constante está sometida a la acción de fuerzas axiales repartidas a lo largo de su eje, de modo tal que originen en ella esfuerzos normales con una ley de repartición lineal o parabólica con un valor máximo N_1 se calculará de acuerdo con las prescripciones del artículo 2.2.4. del Reglamento CIRSOC 302, como si se tratase de una barra de longitud s_k y solicitada en sus extremos por la compresión N_1 y, por tanto, sometida

Tabla 5

	1. Articulada en ambos extremos: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+2,18 \cdot N_0/N_1}{3,18}}$ 2. Empotrada perfectamente en ambos extremos: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+0,93 \cdot N_0/N_1}{7,72}}$
	3. Articulada en ambos extremos: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+1,09 \cdot N_0/N_1}{2,09}}$ 4. Empotrada perfectamente en ambos extremos: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+0,35 \cdot N_0/N_1}{5,40}}$
	5. Las fórmulas (1) y (3) pueden utilizarse también para el dimensionado de barras empotradas en un extremo y libres en el otro y en las que actúan las compresiones N_0 en el extremo libre y N_1 en el empotrado; como valor de s debe tomarse el doble de la longitud de la barra.
	6. Articulada en ambos extremos: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+0,88 \cdot N_0/N_1}{1,88}}$ 7. Empotrada perfectamente en ambos extremos: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+0,93 \cdot N_0/N_1}{7,72}}$ 8. Empotrada perfectamente en 0 y articulada en 1: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+0,51 \cdot N_0/N_1}{3,09}}$ 9. Articulada en 0 y empotrada perfectamente en 1: $s_K = s \cdot \sqrt{\frac{1+1,65 \cdot N_0/N_1}{5,42}}$

OBSERVACIONES: Las fórmulas son válidas para $N_0/N_1 \leq 1$. Pueden utilizarse también si N_0 es una tracción que no excede en valor absoluto de $0,2 \cdot N_1$; en este caso se sustituirá el signo + por un signo -.

da a la compresión axial constante N_1 . Las longitudes de pandeo s_K se tomarán de la tabla 5. Se supone que todas las fuerzas que actúan sobre la barra mantienen su dirección durante el pandeo; esta condición se da como cumplida en los cordones comprimidos de las vigas de celosía que, excepcionalmente, no tengan ningún apoyo transversal y que, por tanto, puedan pandear normalmente al plano de la celosía.

4.6.2. Si las fuerzas que actúan sobre la barra modifican su dirección durante el pandeo, en forma que las rectas de acción de aquéllas coincida constantemente con la tangente a la elástica de pandeo, habrá que tomar para s_K otros valores (ver artículo 3.2.). Así, por ejemplo, las expresiones aproximadas indicadas en la tabla 5, para los casos 1, 3 y 6 tomarán la forma:

$$s_K = s \sqrt{\frac{1 + 0,40 N_0/N_1}{1,40}}$$

$$s_K = s \sqrt{\frac{1 + 0,14 N_0/N_1}{1,14}}$$

$$s_K = s \sqrt{\frac{1 + 0,92 N_0/N_1}{1,92}}$$

respectivamente.

4.7. BARRAS COMPRIMIDAS FORMADAS POR TRAMOS DE DISTINTA SECCION Y DISTINTO ESFUERZO NORMAL APOYADAS ELASTICAMENTE EN DIRECCION TRANSVERSAL

4.7.1. Para obtener la condición crítica de pandeo pueden usarse para definir la configuración de la barra, los desplazamientos transversales y las rotaciones de las secciones que se encuentran sobre los apoyos elásticos (figura 11).

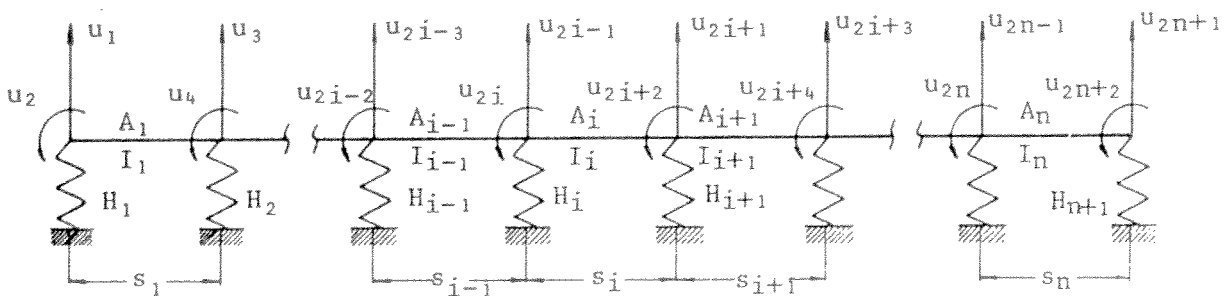


Figura 11

Para un tramo genérico i , es A_i el área de la sección e I_i el momento de inercia de la sección respecto de un eje baricéntrico normal a la figura. La rigidez H_i de un apoyo elástico genérico es el cociente entre el módulo de la fuerza de reacción de dicho apoyo y el desplazamiento u_{2i-1} (siempre con signo positivo).

Para un tramo genérico i , N_i es la fuerza de compresión en la dirección del eje inicial de la barra (negativa si fuera de tracción).

Para facilitar la verificación de la seguridad al pandeo, se supone que al alcanzar la condición crítica los esfuerzos que solicitan cada tramo son $\gamma_K N_i$ y las rigideces de los apoyos son $\frac{H_i}{\mu}$ donde μ es el coeficiente de seguridad de los apoyos, común a todos los apoyos transversales.

Las acciones sobre los extremos de un tramo i , en la configuración deformada están mostradas en la figura 12, donde se suponen con signos positivos.

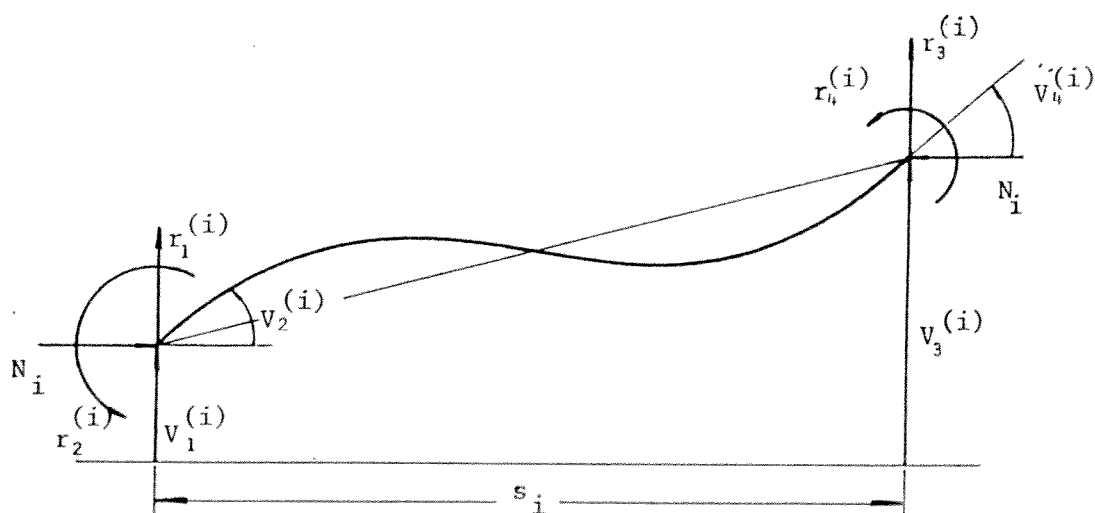


Figura 12

También se muestran los desplazamientos extremos

$$V_1^{(i)} = u_{2i-1}, \quad V_2^{(i)} = u_{2i}, \quad V_3^{(i)} = u_{2i+1}, \quad V_4^{(i)} = u_{2i+2}$$

supuestos positivos.

Si se hace

$$\{r\}_i = \begin{Bmatrix} r_1(i) \\ r_2(i) \\ r_3(i) \\ r_4(i) \end{Bmatrix} \quad y \quad \{V\}_i = \begin{Bmatrix} V_1(i) \\ V_2(i) \\ V_3(i) \\ V_4(i) \end{Bmatrix}$$

se tiene

$$\{r\}_i = [k]_i \{V\}_i$$

donde $[k]_i$ es la matriz de rigidez del tramo i , cuya expresión es

$$[k]_i = \frac{E_t(i) I_i}{s_i} \begin{bmatrix} \frac{12}{s_i^2} \alpha_i & \frac{6}{s_i} \beta_i & -\frac{12}{s_i^2} \alpha_i & \frac{6}{s_i} \beta_i \\ \frac{6}{s_i} \beta_i & 4 \chi_i & -\frac{6}{s_i} \beta_i & 2 \delta_i \\ -\frac{12}{s_i^2} \alpha_i & -\frac{6}{s_i} \beta_i & \frac{12}{s_i^2} \alpha_i & -\frac{6}{s_i} \beta_i \\ \frac{6}{s_i} \beta_i & 2 \delta_i & -\frac{6}{s_i} \beta_i & 4 \chi_i \end{bmatrix}$$

En esta última ecuación $E_t^{(i)}$ es el módulo tangente correspondiente a una tensión

$$\sigma^{(i)} = \gamma_K \frac{N_i}{A_i}$$

calculado de acuerdo con lo establecido en el artículo 4.3. Los factores adimensionales α_i , β_i , χ_i y δ_i se obtienen con las expresiones presentadas en la tabla 6.

Tabla 6

	Valores de α_i , β_i , χ_i , δ_i		
	$N_i > 0$	$N_i = 0$	$N_i < 0$
α_i	$\frac{\epsilon_i^3 \operatorname{sen} \epsilon_i}{12 \phi_c^{(i)}}$	1	$\frac{\epsilon_i^3 \operatorname{senh} \epsilon_i}{12 \phi_t^{(i)}}$
β_i	$\frac{\epsilon_i^2 (1 - \cos \epsilon_i)}{6 \phi_c^{(i)}}$	1	$\frac{\epsilon_i^2 (\cosh \epsilon_i - 1)}{6 \phi_t^{(i)}}$
χ_i	$\frac{\epsilon_i (\operatorname{sen} \epsilon_i - \epsilon_i \cos \epsilon_i)}{4 \phi_c^{(i)}}$	1	$\frac{\epsilon_i (\epsilon_i \cosh \epsilon_i - \operatorname{senh} \epsilon_i)}{4 \phi_t^{(i)}}$
δ_i	$\frac{\epsilon_i (\epsilon_i - \operatorname{sen} \epsilon_i)}{2 \phi_c^{(i)}}$	1	$\frac{\epsilon_i (\operatorname{senh} \epsilon_i - \epsilon_i)}{2 \phi_t^{(i)}}$
$\phi_c^{(i)} = 2 - 2 \cos \epsilon_i - \epsilon_i \operatorname{sen} \epsilon_i ; \quad \phi_t^{(i)} = 2 - 2 \cosh \epsilon_i + \epsilon_i \operatorname{senh} \epsilon_i$ $\epsilon_i = s_i \sqrt{\frac{\gamma_K N_i }{E_t^{(i)} I_i}}$			

Si es

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ u_{2n+2} \end{Bmatrix}$$

en la condición crítica se tiene

$$[K] \{u\} = \{0\}$$

donde $[K]$ es la matriz de rigidez de la estructura correspondiente con las

coordenadas $\{u\}$.

Los elementos de esta matriz simétrica se obtienen en base a las rigideces de los tramos y de los apoyos. Los elementos no nulos son los que se indican a continuación y sus simétricos.

$$K_{11} = 12 \alpha_1 \frac{E_t^{(1)} I_1}{s_1^3} + \frac{H_1}{\mu}$$

$$K_{12} = 6 \beta_1 \frac{E_t^{(1)} I_1}{s_1^2}$$

$$K_{22} = 4 \chi_1 \frac{E_t^{(1)} I_1}{s_1}$$

$$K_{2i-1, 2i+1} = -12 \alpha_i \frac{E_t^{(i)} I_i}{s_i^3} ; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$K_{2i-1, 2i+2} = -K_{2i, 2i+1} = 6 \beta_i \frac{E_t^{(i)} I_i}{s_i^2} ; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$K_{2i, 2i+2} = 2 \delta_i \frac{E_t^{(i)} I_i}{s_i} ; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$K_{2i+1, 2i+1} = 12 \alpha_i \frac{E_t^{(i)} I_i}{s_i^3} + 12 \alpha_{i+1} \frac{E_t^{(i+1)} I_{i+1}}{s_{i+1}^3} + \frac{H_{i+1}}{\mu} ; \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$K_{2i+1, 2i+2} = -6 \beta_i \frac{E_t^{(i)} I_i}{s_i^2} + 6 \beta_{i+1} \frac{E_t^{(i+1)} I_{i+1}}{s_{i+1}^2} ; \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$K_{2i+2, 2i+2} = 4 \chi_i \frac{E_t^{(i)} I_i}{s_i} + 4 \chi_{i+1} \frac{E_t^{(i+1)} I_{i+1}}{s_{i+1}} ; \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$K_{2n+1, 2n+1} = 12 \alpha_n \frac{E_t^{(n)} I_n}{s_n^3} + \frac{H_{n+1}}{\mu}$$

$$K_{2n+1, 2n+2} = -6 \beta_n \frac{E_t^{(n)} I_n}{s_n^2}$$

$$K_{2n+2, 2n+2} = 4 \chi_n \frac{E_t^{(n)} I_n}{s_n}$$

4.7.2. La condición crítica de pandeo puede plantearse igualando a cero el determinante de la matriz de rigidez $|K|$, o sea

$$|K| = 0$$

La verificación de la seguridad al pandeo puede realizarse según dos maneras distintas:

- a) Suponiendo $\mu = 1$, (en cuyo caso se consideran en el cálculo las rigideces verdaderas de los apoyos), debe encontrarse el menor valor positivo de γ_K , que satisfaga la ecuación $|K| = 0$. Dicho valor es el coeficiente de seguridad de la barra frente al pandeo.
- b) En la ecuación $|K| = 0$, se fija un valor de γ_K igual al grado de seguridad deseado frente al pandeo y debe hallarse el menor valor positivo de μ , que satisfaga la ecuación. Si se obtiene $\mu \geq 1$, esto significa que la seguridad al pandeo es igual o superior al valor de γ_K fijado.

4.7.3. Como alternativa, en lugar de plantear la condición de pandeo anulando el determinante de la matriz de rigidez $[K]$, pueden anularse los elementos de la matriz de rigidez absoluta.

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ R_j \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{2n+2} \end{Bmatrix}$$

Para calcular la rigidez absoluta R_j , puede usarse la expresión

$$R_j = - \{A\}_j^T \{K\}_j$$

siendo:

$\{K\}_j$ la columna j de la matriz $[K]$;

$\{A\}_j^T$ una matriz fila formada con los elementos de la fila j de la matriz $[K]_j^{-1}$;

$[K]_j$ una matriz que se obtiene sustituyendo en la matriz $[K]$, la columna j por una columna formada por elementos todos nulos salvo

el de la fila j , que es igual a -1 .

Si todos los elementos de la matriz de rigidez absoluta son positivos, la estructura es estable. La condición crítica de pandeo se tiene cuando alguno de ellos se anula.

La verificación de la seguridad puede hacerse:

- Suponiendo $\mu = 1$, debe encontrarse el menor valor positivo de γ_K , que anule cualquier R_j . Dicho valor es el coeficiente de seguridad de la barra frente al pandeo.
- Se fija un valor de γ_K igual al grado de seguridad deseado frente al pandeo y debe hallarse el menor valor positivo de μ que anule cualquiera de los R_j . Si se obtiene $\mu \geq 1$, esto significa que la seguridad al pandeo es igual o superior al valor de γ_K fijado.

4.7.4. El método explicado en el artículo 4.7.2. puede aplicarse también en el caso en que el tramo de barra comprendido entre dos apoyos presente a su vez dos o más tramos con distinto valor del esfuerzo de compresión N o con secciones distintas. Para ello se suponen apoyos ficticios de rigidez nula en los puntos donde se presentan las discontinuidades, como puede verse, por ejemplo, en la figura 13.

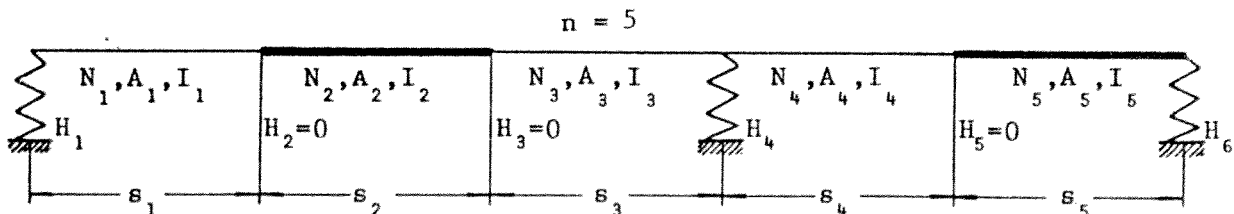


Figura 13

4.7.5. Si alguno de los apoyos es indesplazable (es decir que su correspondiente rigidez H_i tiende a infinito), se formará la matriz de rigidez en la forma explicada en el artículo 4.7.2. En la ecuación $|K| = 0$, se dividirá por H_i todos los elementos de la fila donde aparece H_i y luego se hará $\frac{1}{H_i} = 0$, con lo cual todos los elementos de la fila se anulan con excepción de uno que queda igual a $\frac{1}{\mu}$. Se procede luego en la forma indicada en el artículo 4.7.2. mencionado precedentemente.

4.7.6. La verificación al pandeo de barras simples, de sección constante

mostradas en la tabla 7, puede realizarse siguiendo el procedimiento establecido en el artículo 2.2.4. del Reglamento CIRSOC 302, si la esbeltez de la barra se obtiene con la expresión

$$\lambda_z = \frac{s_{Kz}}{i_z}$$

siendo:

s_{Kz} = $\beta \cdot s$ la longitud de pandeo ;

s la longitud de barras entre apoyos, según se indica en los dibujos de la tabla 7;

β el coeficiente a obtener con las fórmulas presentadas en la tabla 7 ;

$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$ el radio de giro de la sección;

I_z el momento de inercia de la sección respecto de un eje baricéntrico normal al plano de los dibujos en la tabla 7;

A el área de la sección.

En las fórmulas de la tabla 7 para obtener β , es

$$\psi = \frac{H s^3}{E I_z} ;$$

H la rigidez de los apoyos elásticos;

E el módulo de elasticidad;

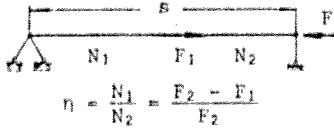
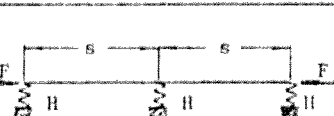
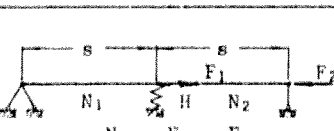
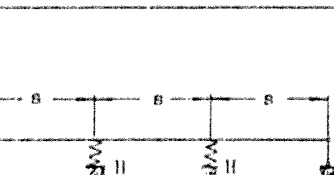
$\eta = \frac{N_1}{N_2}$ la relación entre el menor esfuerzo normal y el mayor esfuerzo normal entre los esfuerzos normales de los tramos. Los esfuerzos normales de compresión son positivos y los de tracción negativos.

4.7.7. Si la barra es compuesta (grupos I o III, según el artículo 2.2.5. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero") y el eje z es un eje no material, es aplicable lo establecido en el artículo precedente, siempre que se use

$$\lambda_z = \lambda_{zi} = \sqrt{\left(\frac{s_{Kz}}{i_z}\right)^2 + \frac{m}{2} \lambda_1}$$

donde s_{Kz} , i_z tienen el significado explicado en el artículo precedente y λ_{zi} , m , λ_1 , el significado explicado en el artículo 2.2.5. del Reglamento CIRSOC 302.

Tabla 7

	Esquema estructural	Valores de β
1	 $\eta = \frac{N_1}{N_2} = \frac{F_2 - F_1}{F_2}$	$\beta = \begin{cases} -0,0224 \eta^2 + 0,295 \eta + 0,727, & \text{para } 0 \leq \eta \leq 1 \\ 0,0905 \eta^2 + 0,318 \eta + 0,727, & \text{para } -1 \leq \eta \leq 0 \end{cases}$
2		$\beta = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{1 + 0,1659 \Psi - 0,0007 \Psi^2}} & \text{para } 0 < \Psi < 2\pi^2 \\ 1 & \text{para } \Psi > 2\pi^2 \end{cases}$
3		$\beta = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{0,994 + 0,1116 \Psi - 0,00034 \Psi^2}} & \text{para } 4 \leq \Psi \leq 29,6 \\ 1 & \text{para } \Psi > 29,6 \end{cases}$
4	 $\eta = \frac{N_1}{N_2} = \frac{F_2 - F_1}{F_2}$	$\beta = \left[(0,000882 \eta^2 + 0,000454 \eta - 0,00158) \Psi^2 + (-0,0249 \eta^2 - 0,00101 \eta + 0,0682) \Psi + 0,121 \eta^2 - 0,344 \eta + 0,473 \right]^{-1/2}$ para $0 \leq \eta \leq 1$ y $0 \leq \Psi_0 \leq 20$
5		$\beta = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{-0,00021 \Psi^2 + 0,09247 \Psi + 0,1111}} & \text{para } 2 \leq \Psi \leq 4,84 \\ \frac{1}{\sqrt{-0,000168 \Psi^2 + 0,02382 \Psi + 0,4422}} & \text{para } 4,84 < \Psi < 29,7 \\ 1 & \text{para } \Psi \geq 29,7 \end{cases}$

CAPITULO 5. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.4. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

5.1. PANDEO ALABEADO CON TORSION Y FLEXION DE BARRAS COMPRIMIDAS EXCENTRICAMENTE

5.1.1. En una barra recta de sección constante, abierta y de paredes delgadas, existe el peligro del pandeo alabeado con torsión y flexión descrito en el capítulo 2. Si la barra posee al menos un eje de simetría y el punto de aplicación de la fuerza de compresión está situado sobre dicho eje de simetría (z) a la distancia $\pm e$ del centro de gravedad de la sección, puede dimensionarse la barra mediante el procedimiento indicado en el artículo 2.2.4.1. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", con tal de considerar para ello una esbeltez ideal λ_{vi} .

5.1.2. Este grado de esbeltez ideal ha de calcularse mediante la fórmula:

$$\lambda_{vi} = \frac{\beta \cdot s}{i_z} \sqrt{\frac{i_T^2 + i_C^2 + e(ry - 2z_C)}{2i_T^2} \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4i_T^2 [i_0^2 + e(ry - e) + 0,093(\beta^2/\beta_0^2 - 1)(e - z_C)^2]}{[i_T^2 + i_C^2 + e(ry - 2z_C)]^2}} \right\}}$$

Ha de escogerse siempre el signo de la segunda raíz que da el mayor valor real para λ_{vi} . Los valores i_C , i_0 , z_C , i_T , s , s_0 , β y β_0 han de tomarse del artículo 4.4.2. El valor de la magnitud r_y es

$$r_y = \sqrt{\iint_A \frac{z(y^2 + z^2)}{I_y} dA}$$

que se anula en secciones en donde también el eje y es de simetría.

Para las secciones según las figuras 9 a y 9 b resulta:

$$r_y = \frac{1}{I_y} \left\{ z_C \cdot I_z + A_1 a^3 - A_2 (h - a)^2 + \frac{t_3}{4} [a^4 - (h - a)^4] \right\}$$

Para las secciones según la figura 9 c resulta:

$$r_y = \frac{1}{I_y} \left\{ a (A_3 a^3 + I_3) + (2a - h) I_1 + \frac{t_1}{2} [a^4 - (h - a)^4] \right\}$$

Adoptando un sistema de coordenadas cartesianas ortogonales de modo que los ejes y, z sean los principales de inercia baricéntricos en la sección, e,

z_C y r_y pueden ser positivos o negativos.

5.1.3. Para $e = z_C$, es decir, si el punto de aplicación de la fuerza coincide con el centro de corte, resulta la esbeltez ideal igual al mayor valor que se obtenga de las expresiones: (ver además el artículo 2.1.2.)

$$\lambda_{Vi} = \frac{\beta \cdot s}{i_z} \sqrt{\frac{i_C^2 + z_C (r_y - 2z_C)}{i_T^2}} \quad \text{ó} \quad \lambda_{Vi} = \frac{\beta \cdot s}{i_z}$$

5.1.4. Si una barra comprimida excéntricamente está sostenida lateralmente, por ejemplo, mediante un arriostramiento longitudinal vinculado mediante una articulación que se encuentra a una distancia f del eje de la barra en la dirección del eje z (figura 14) el peligro del pandeo flexotorsional depende de la posición del arriostramiento. Para este caso resulta la esbeltez ideal

$$\lambda_{Vi} = \frac{\beta \cdot s}{i_z} \sqrt{\frac{i_0^2 + f^2 + e (r_y - 2f)}{i_T^2 + (f - z_C)^2}}$$

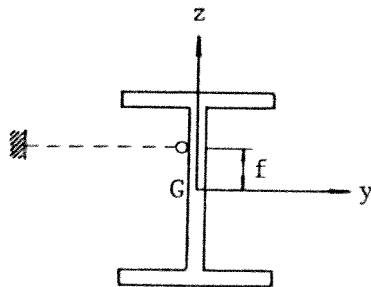


Figura 14

Si, en particular, es

$$e = \frac{i_0^2 + f^2}{2f - r_y}$$

resulta:

$$\lambda_{Vi} = 0$$

y el pandeo por flexotorsión es imposible.

5.2. VERIFICACION DE LA CAPACIDAD RESISTENTE DE BARRAS COMPRIMIDAS EXCENTRICAMENTE CON TEORIA DE SEGUNDO ORDEN

En lugar de la comprobación exigida en el artículo 2.4.2. del Reglamento CIRSOC 302 mediante las fórmulas I y II, puede realizarse también una verificación de la seguridad de la pieza mediante teoría de segundo orden suponiendo un diagrama de tensión - deformación del acero elástico - plástico ideal, siempre que no sea decisivo el pandeo flexotorsional según el artículo 5.1.

En este caso de verificación con teoría de segundo orden hay que comprobar que las máximas tensiones, calculadas planteando las ecuaciones de equilibrio en la configuración deformada, que se producen bajo la acción de las cargas multiplicadas por γ_{Kr} , no superan el límite de fluencia. Se tomará $\gamma_{Kr} = \frac{8}{7} \gamma$, siendo γ el coeficiente de seguridad determinado de acuerdo con las prescripciones del reglamento correspondiente a la estructura (en el caso de edificios, CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios") las tensiones de fluencia para cada tipo de acero se tomarán de la tabla 1 del Reglamento CIRSOC 301.

CAPITULO 6. RECOMENDACIONES AL ARTICULO 2.5. DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

6.1. PROCEDIMIENTO APROXIMADO PARA LA VERIFICACION DE LA ESTABILIDAD DE LOS CORDONES COMPRIMIDOS EN UN PUENTE ABIERTO (PUENTE DE TABLERO INFERIOR)

6.1.1. En los puentes de reticulado abiertos cada tramo del cordón comprimido será verificado con respecto al pandeo en un plano normal al de la viga principal, suponiendo una longitud libre $s_K = \beta \cdot s$. En esta expresión debe ser $\beta > 1,2$, porque de lo contrario, el procedimiento aproximado carece de la precisión necesaria, ya que se basa en la hipótesis simplificativa de considerar al cordón apoyado en una fundación continua cuya rigidez por unidad de longitud es igual al cociente entre la rigidez del pórtico H_1 y la longitud de un tramo. Como límite superior se fija $\beta = 3$ por razones constructivas y económicas. Dentro del intervalo $1,2 \leq \beta \leq 3$, valores elevados de β obtenidos mediante un cordón de rigidez elevada y pórticos flexibles y valores pequeños de β obtenidos mediante un cordón flexible y pórticos de gran rigidez pueden conducir a la misma seguridad del cordón comprimido frente al pandeo fuera del plano del reticulado.

6.1.2. Según que este procedimiento aproximado se utilice como comprobación (por ejemplo de un puente ya en servicio) o como cálculo inicial (por ejemplo, en el proyecto de un puente), se distinguen dos métodos I y II, que, a su vez, comprenden: un caso a), en el que los extremos del cordón comprimido están impedidos de desplazarse normalmente al plano de la viga principal, y un caso b), en que los extremos de dicho cordón están elásticamente apoyados en pórticos transversales abiertos.

I) Comprobación a posteriori del cordón comprimido: en este caso son conocidos el área de la sección A , el momento de inercia I_z y el esfuerzo de compresión N de cada tramo del cordón. Para hacer posible un total aprovechamiento de la tensión admisible σ_{adm} , tomada como base para el cálculo, deberán determinarse primeramente los coeficientes de pandeo

$$\omega_z = \frac{A \sigma_{adm}}{N}$$

para cada una de las barras del cordón y después obtener, mediante las tablas 1 a 6 del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", se

gún el tipo de acero, las correspondientes esbelteces λ_z . La tabla 3 nos da para cada tipo de acero, la relación

$$\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma}$$

siendo:

γ_K el coeficiente de seguridad de Engesser;

γ el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura determinado de acuerdo con lo establecido en los reglamentos correspondientes.

Conocidos ρ y γ , se calcula

$$\gamma_K = \rho \gamma$$

Seguidamente, han de calcularse los coeficientes β correspondientes a ca da barra del cordón mediante

$$\beta = \frac{SKz}{s} = \frac{\lambda_z}{s} \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

y se obtendrá su media aritmética β_m . Con esto conocemos todas las magnitudes necesarias para el cálculo de H_0 , según la fórmula de Engesser

$$H_0 = \frac{2,5 \gamma_K}{\beta_m^2} \frac{\text{máx } N}{\text{mín } S}$$

A continuación se determinan las rigideces H_1 y, en caso necesario H_2 . Pueden calcularse aproximadamente con la expresión:

$$H = \frac{E}{\frac{h_v^3}{3I_v} + \frac{h^2 b_q}{2 I_q}}$$

asumiendo para los momentos de inercia I_v e I_q , cuando son variables, sus valores medios (figura 14 del Reglamento CIRSOC 302). El módulo de elasticidad E se tomará igual a 210 000 N/mm² (2 100 000 kgf/cm²).

Caso a) Si los puntos extremos del cordón comprimido son indesplazables perpendicularmente al plano de la viga principal, resultan $H_2 = c_2 = \infty$, $c_1 = 1$, y deben calcularse solamente las rigideces H_1 de los pórticos intermedios. Si ninguno de estos valores H_1 es menor

que el valor H_0 antes calculado según la fórmula de Engesser, la rigidez lateral del cordón comprimido es suficiente.

Caso b) Si los extremos del cordón comprimido sólo están apoyados elásticamente en dirección normal al plano de la viga principal, se deben calcular, además de las rigideces H_1 de los pórticos intermedios, la rigidez H_2 de los pórticos extremos. Con el menor de los valores H_1 se determinará la relación:

$$\alpha = \frac{\text{mín } H_1}{H_2}$$

y con ella pueden calcularse los coeficientes C_1 y C_2 mediante las fórmulas:

$$C_1 = \frac{1 + 0,6 \alpha \cdot \beta_m}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1,44 \alpha \cdot \beta_m}{(1 + 0,6 \alpha \cdot \beta_m)^2}} \right);$$

$$C_2 = \frac{C_1}{\alpha}$$

El Reglamento CIRSOC 302 queda satisfecho si se verifica que:

$$H_1 \geq C_1 H_0 \text{ para cada pórtico intermedio y}$$

$$H_2 \geq C_2 H_0 \text{ para los pórticos extremos.}$$

II) Cálculo de proyecto del cordón comprimido: en este caso han de dimensionarse las distintas barras que componen el cordón comprimido con la longitud $s_{Ky} = s$ para el pandeo en el plano de la viga principal y $s_{Kz} = \beta \cdot s$ para el pandeo en el plano perpendicular a dicha viga, tomándose el valor β igual para todas las barras y eligiéndoselo de modo que sea $1,20 \leq \beta \leq 3,00$. Después de elegir las secciones del cordón hay que calcular para todas las barras el coeficiente de pandeo:

$$\omega_z = \frac{A \sigma_{adm}}{N}$$

y tomar de las tablas 1 a 6 del Reglamento CIRSOC 302 las correspondientes esbelteces λ_z . Con la mayor de estas esbelteces λ_z y de acuerdo con el tipo de acero de que se trate, la tabla 3 da la relación:

$$\rho = \frac{\gamma_K}{\gamma}$$

siendo:

γ_K el coeficiente de seguridad de Engesser;

γ el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura determinado de acuerdo con lo establecido en los reglamentos correspondientes.

Conocidos ρ y γ , se calcula

$$\gamma_K = \rho \gamma$$

A continuación deben calcularse los valores β correspondientes a las distintas barras, por medio de la fórmula

$$\beta = \frac{\lambda_z}{s} \sqrt{\frac{I_z}{A}}$$

Mediante una elección adecuada de las magnitudes A e I_z , debe procurarse que los valores β de las distintas barras del cordón difieran muy poco entre sí. Se calculará la media aritmética β_m de todos los valores, con lo cual se tienen todas las magnitudes necesarias para la fórmula de Engesser

$$H_0 = \frac{2,5 \gamma_K}{\beta_m^2} \frac{\text{máx } N}{\text{mín } s}$$

Luego se calculan las rigideces de pórticos H_1 y en caso necesario H_2 . Pueden calcularse aproximadamente con la expresión

$$H = \frac{E}{\frac{h_y^3}{3 I_v} + \frac{h^2 b_q}{2 I_q}}$$

asumiendo para los momentos de inercia I_v e I_q , cuando son variables, sus valores medios (figura 14 del Reglamento CIRSOC 302). El módulo de elasticidad E se tomará igual a 210 000 N/mm² (2 100 000 kgf/cm²).

Caso a) Si los puntos extremos del cordón comprimido son indesplazables perpendicularmente al plano de la viga principal, resultan $H_2 = C_2 = \infty$, $C_1 = 1$ y deben calcularse solamente las rigideces H_1 de los pórticos intermedios. Si ninguno de estos valores H_1 es menor que el valor H_0 antes calculado según la fórmula de Engesser, la rigidez lateral del cordón comprimido es suficiente.

Caso b) Si los extremos del cordón comprimido sólo están apoyados elásticamente en dirección normal al de la viga principal, se deben calcular además de las rigideces H_1 de los pórticos intermedios, la rigidez H_2 de los pórticos extremos. Por razones de economía el coeficiente C_1 se elige de modo que $1,1 < C_1 < 1,5$; el coeficiente C_2 se calcula con la fórmula

$$C_2 = \frac{0,6 C_1 - 0,36}{C_1 - 1} \cdot \beta_m$$

El Reglamento CIRSOC 302 queda satisfecho si se verifica que $H_1 \geq C_1 H_0$ para cada pórtico intermedio y que $H_2 \geq C_2 H_0$ para los pórticos extremos.

De lo que antecede, resulta evidente que, para un valor constante de β_m , el coeficiente C_2 es tanto más pequeño cuanto mayor es el C_1 . Por lo tanto, los pórticos extremos pueden ser tanto más flexibles cuanto más rígidos sean los intermedios y viceversa.

Se tienen pórticos intermedios más flexibles cuando los puntos extremos del cordón comprimido son indesplazables perpendicularmente al plano de la viga principal. Cuanto más rígido se haya proyectado el cordón comprimido, tanto más flexibles pueden ser los pórticos de apoyo.

Si la rigidez H_2 de los pórticos extremos resulta demasiado elevada y en consecuencia dichos pórticos demasiado pesados, es necesario repetir el cálculo con un nuevo valor de C_1 , mayor que el anterior, pero siempre comprendido entre los límites 1,1 y 1,5, con lo cual serán más rígidos los pórticos intermedios. Si resultan demasiado pesados tanto los pórticos extremos como los intermedios, debe elegirse un nuevo valor de β entre los límites 1,2 y 3,0 pero mayor que el anterior con lo cual aumentará la rigidez del cordón comprimido, es decir con I_z mayor. Se deberá tomar un valor $C_1 \geq 1,5$ cuando, a pesar de un alto valor de β_m y, por lo tanto, de una gran rigidez del cordón, se tengan que reforzar los pórticos intermedios para conseguir unos pórticos extremos ligeros.

6.2. CALCULO MAS PRECISO PARA LA VERIFICACION DE LA ESTABILIDAD DE LOS CORDONES COMPRIMIDOS DE UN PUENTE ABIERTO

6.2.1. Una comprobación más rigurosa de la estabilidad del cordón comprimido de un puente abierto puede realizarse siguiendo el procedimiento expuesto en el artículo 4.7. Las rigideces H_1 de los pórticos transversales de apoyo del cordón, se determinarán con ayuda de las expresiones indicadas en el ar-

título 6.1.2. y se introducirán en las fórmulas como $\frac{H_i}{\mu}$ siendo μ el coeficiente de seguridad de los apoyos. Si en la sección del cordón comprimido no coincide el baricentro con el centro de corte (por ejemplo en una sección T), debe tomarse como momento de inercia el valor reducido I_z^* , de acuerdo con el artículo 2.5.2.1. del Reglamento CIRSOC 302.

6.2.2. El coeficiente de seguridad de Engesser γ_K , de los cordones comprimidos de un puente abierto, debe cumplir la condición

$$\gamma_K \geq \frac{4}{3} \gamma$$

siendo:

γ el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura establecido de acuerdo con los reglamentos correspondientes.

6.2.3. En los puentes abiertos simétricos respecto al plano transversal que pasa por el centro de la luz, simétricamente cargados, el pandeo del cordón comprimido puede producirse según un modo simétrico o antisimétrico. El estudio se puede limitar a la mitad del cordón, verificando la seguridad del cordón para ambos modos de pandeo.

6.2.4. Si el cordón tiene un número total de barras par, $2m$, para estudiar el modo simétrico de pandeo se considera la estructura mostrada en la figura 15, formada por los m tramos que quedan a un lado de la sección de simetría del cordón.

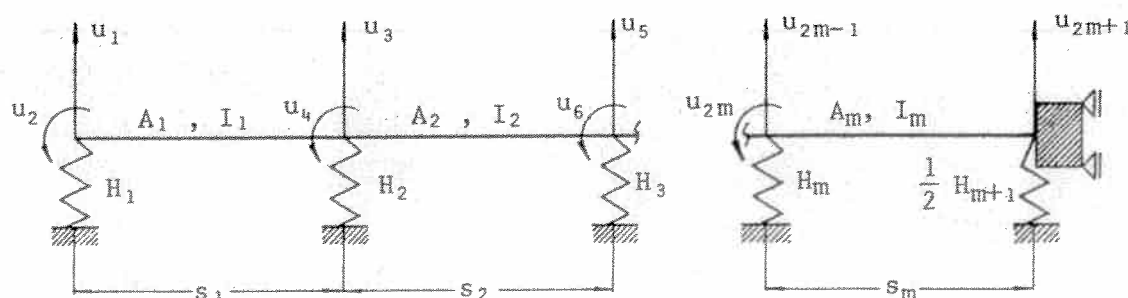


Figura 15

Dicha sección está impedida de girar y la rigidez del apoyo elástico H_{m+1} , reducida a la mitad. La matriz de rigidez $[K]$ correspondiente a las coordenadas $u_1, u_2, \dots, u_{2m+1}$, se obtiene con las fórmulas consignadas al final

del artículo 4.7.1. poniendo $n = m$ y limitando la determinación a las $2m+1$ primeras filas y $2m+1$ primeras columnas, ya que éstas son, en este caso, las dimensiones de la matriz de rigidez.

Para estudiar el modo antisimétrico del pandeo, se considera la estructura mostrada en la figura 16, formada por los m tramos que quedan a un lado de la sección de simetría del cordón. Como dicha sección no se desplaza transversalmente se pone $H_{m+1} = \infty$. La matriz de rigidez $[K]$ correspondiente a las coordenadas $u_1, u_2, \dots, u_{2m+2}$, se obtiene con las fórmulas consignadas al final del artículo 4.7.1. Después de plantear la condición crítica de pandeo, debe tenerse en cuenta lo indicado en el artículo 4.7.5.

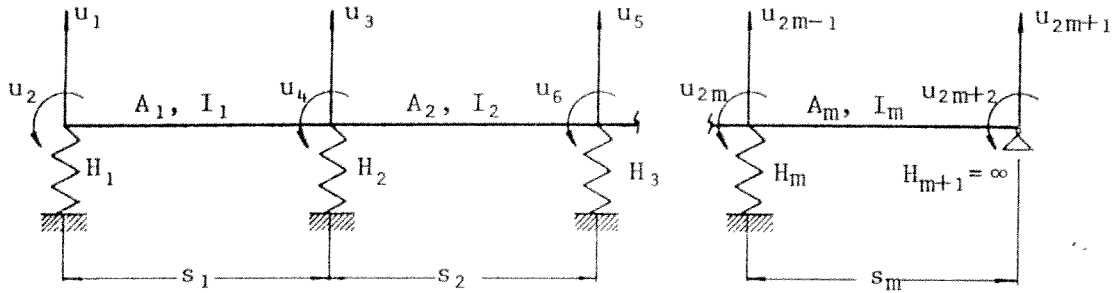


Figura 16

6.2.5. Si el cordón tiene un número total de barras impar, $2m-1$, para estudiar el modo simétrico de pandeo, se considera la estructura mostrada en la figura 17, formada por los m tramos que quedan a un lado de la sección de simetría del cordón. Dicha sección no gira en el modo simétrico de pandeo y la rigidez del apoyo elástico H_{m+1} es nula. La longitud del tramo m es la mitad de la longitud real de la barra central del cordón.

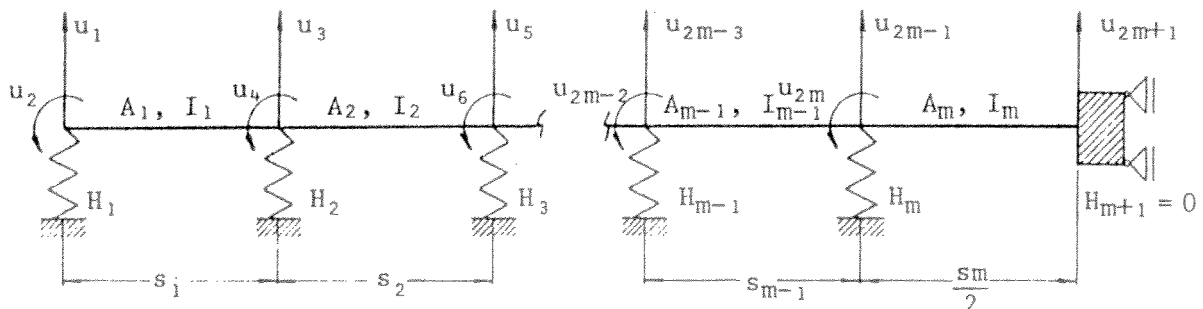


Figura 17

La matriz de rigidez $[K]$ correspondiente a las coordenadas $u_1, u_2, \dots, u_{2m+2}$, se obtiene con las fórmulas consignadas al final del artículo 4.7.1., poniendo $n = m$ y limitando la determinación a las $2m + 1$ primeras filas y $2m + 1$ primeras columnas, ya que éstas son, en este caso, las dimensiones de la matriz de rigidez.

Para estudiar el modo antisimétrico de pandeo se considera la estructura mostrada en la figura 18, formada por los m tramos que quedan a un lado de la sección de simetría del cordón. Como dicha sección no se desplaza transversalmente se pone $H_{m+1} = \infty$. La longitud del tramo m es la mitad de la longitud real de la barra central del cordón. La matriz $[K]$ correspondiente a las coordenadas $u_1, u_2, \dots, u_{2m+2}$, se obtiene con las fórmulas presentadas al final del artículo 4.7.1. Después de plantear la condición crítica de pandeo, debe tenerse en cuenta lo indicado en el artículo 4.7.5.

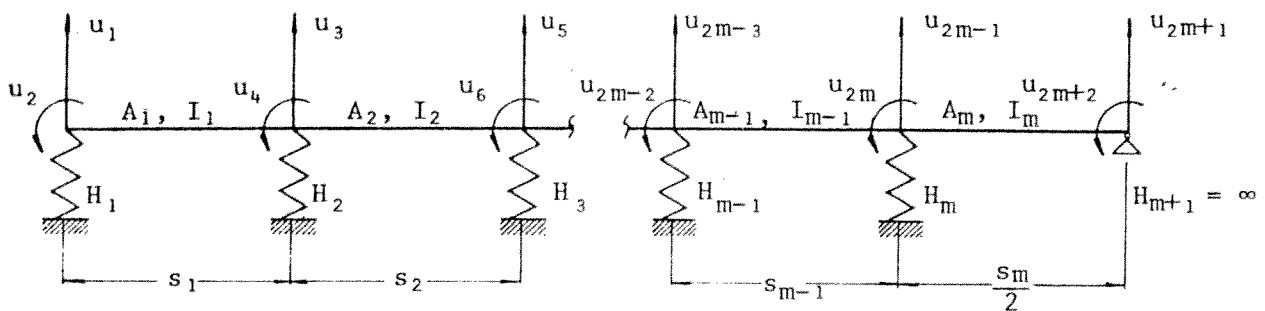


Figura 18

CAPITULO 7. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 3 DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

7.1. PANDEO EN SU PROPIO PLANO DE ARCOS PARABOLICOS SIMETRICOS

7.1.1. En base a lo establecido en el artículo 3.1.1. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero" para un arco parabólico simétrico de sección constante sometido a la acción de una carga vertical uniformemente repartida sobre toda su luz, debe cumplirse la condición

$$\omega \frac{H}{A} \sqrt{1 + \frac{4 f^2}{l^2}} \leq \sigma_{adm}$$

siendo:

H la componente de la reacción de apoyo en la dirección horizontal, calculada teniendo en cuenta los coeficientes dinámicos pero no los efectos de fatiga;

ω , A, f, l y σ_{adm} lo explicado en el artículo 3.1 del Reglamento CIRSOC 302

7.1.2. Los arcos cuya sección tiene momento de inercia I_y variable, pero el área A poco variable, se han considerado en el artículo 3.1.3. del Reglamento CIRSOC 302. El valor medio del momento de inercia $I_y = A i_y^2$ puede calcularse según lo establecido en el artículo 4.5., o bien puede tomarse igual al momento de inercia de la sección constante de una viga recta de longitud s que, cargada en su centro por una carga transversal F (figura 19), experimenta la misma flecha w que presentaría la mitad del arco, rectificada y cargada transversalmente con la misma carga F. Las condiciones de apoyo de la viga prismática y del semiarco rectificado serán:

- a) Simplemente apoyadas, en caso de arcos de dos y tres articulaciones.
- b) Empotradas en el extremo izquierdo y articuladas en el derecho, en caso de arcos empotrados.

7.1.3. Cuando el esfuerzo normal es muy variable, la verificación al pandeo con la barra equivalente que establece el artículo 3.1.1. del Reglamento CIRSOC 302 debe realizarse teniendo en cuenta las instrucciones del artículo 4.6.; en consecuencia, debe multiplicarse su longitud ficticia $\beta \cdot s$ por

el valor de la raíz cuadrada correspondiente que figura en la tabla 5. En caso en que el área A de la sección sea muy variable, o si el arco se apoya elásticamente en su propio plano puede realizarse el cálculo al pandeo de la barra equivalente siguiendo los lineamientos del artículo 4.7.

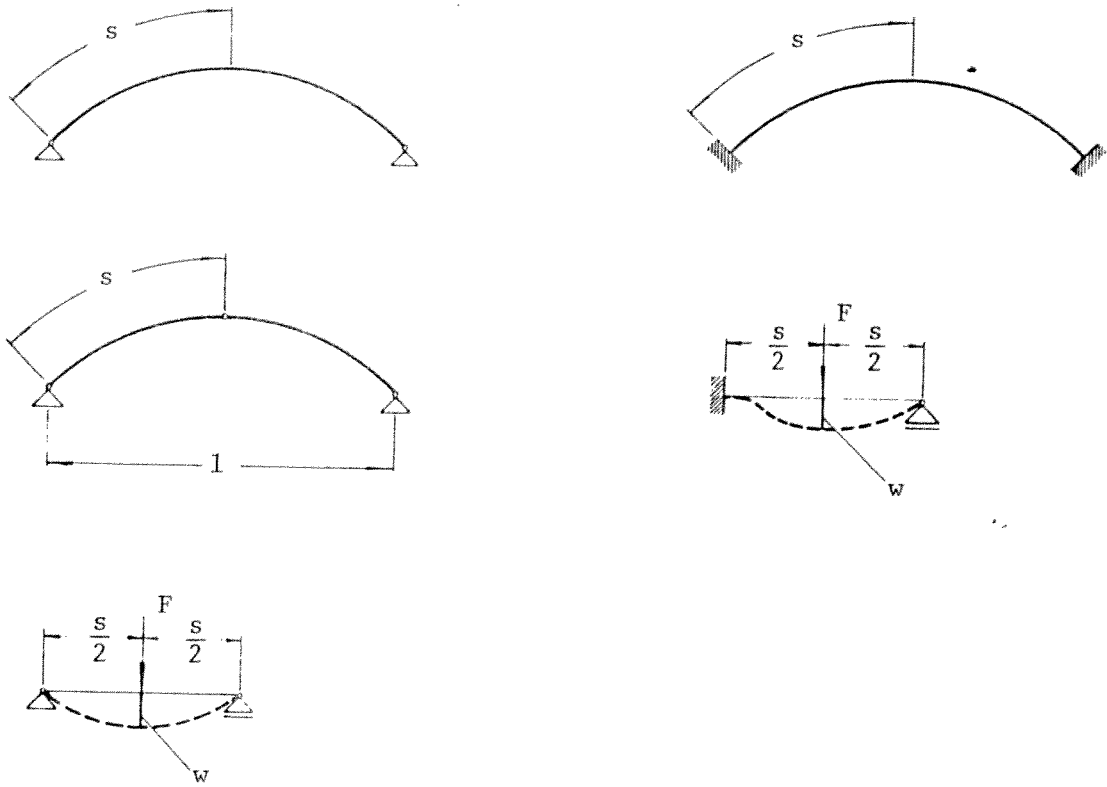


Figura 19

CAPITULO 8. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 4 DEL REGLAMENTO CIRSOC 302

8.1. LONGITUDES DE PANDEO DE LAS COLUMNAS DE PORTICOS RECTANGULARES DE UN VANO Y VARIOS PISOS O DE UN PISO Y VARIOS VANOS

En lo que sigue se dan las fórmulas aproximadas para la longitud de pandeo

$$s_k = \beta h$$

de estos pórticos. Las fórmulas se aplican al caso de pandeo en el plano del pórtico. El artículo 4.2. del Reglamento CIRSOC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero", es en este caso válido sin ninguna modificación.

8.1.1. En el caso de un pórtico aislado de un solo vano y de dos pisos, doblemente empotrado (figura 20), puede ponerse:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} (1 + m)} \sqrt{1 + 12,5 \alpha + 0,89 (1 - \alpha) \cdot c - 0,003 (1 - \alpha) \cdot c^3}$$

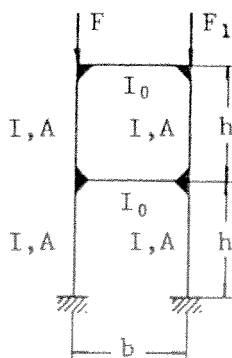


Figura 20

siendo:

$$m = \frac{F_1}{F} \leq 1; \quad c = \frac{I b}{I_0 h} \leq 10; \quad \alpha = \frac{4 I}{b^2 A} \leq 0,2$$

8.1.2. En el caso de un pórtico aislado de un solo vano y n pisos, doblemen

te empotrado (figura 21), puede ponerse

$$\beta_{0,1} = \frac{\sum_{0}^{n-1} d_m + R_n}{\sum_{0}^{n-1} k_m}$$

$$\beta_{m,m+1} = \beta_{0,1} \cdot q_m$$

$$d_m = \frac{N_{m,m+1} \cdot h_{m,m+1}}{N_{0,1} \cdot h_{0,1}} ; R_n = \frac{c}{6} \left[\sum_{2}^n r_m + k_{n-1}^2 \cdot \frac{I_1}{I_n} \right] + 0,6n (3n^2-1) \alpha$$

$$c = \frac{I_{0,1} \cdot b}{I_1 \cdot h_{0,1}} ; \alpha = \frac{4 I_{0,1}}{b^2 \cdot A_{0,1}} ; r_m = k_{m-2}^2 (1+k_{m-1})^2 \frac{I_1}{I_{m-1}}$$

$$k_m = \sqrt{\frac{I_{m,m+1} \cdot N_{m,m+1}}{I_{0,1} \cdot N_{0,1}}} = k_{m-1} \cdot \kappa_m ; \kappa_m = \sqrt{\frac{I_{m,m+1} \cdot N_{m,m+1}}{I_{m-1,m} \cdot N_{m-1,m}}}$$

$$q_m = \frac{h_{0,1}}{h_{m,m+1}} \sqrt{\frac{I_{m,m+1} \cdot N_{0,1}}{I_{0,1} \cdot N_{m,m+1}}} \quad \begin{aligned} d_0 &= \kappa_0 = k_0 = q_0 = 1 ; \\ d_n &= \kappa_n = k_n = q_n = 0 \end{aligned}$$

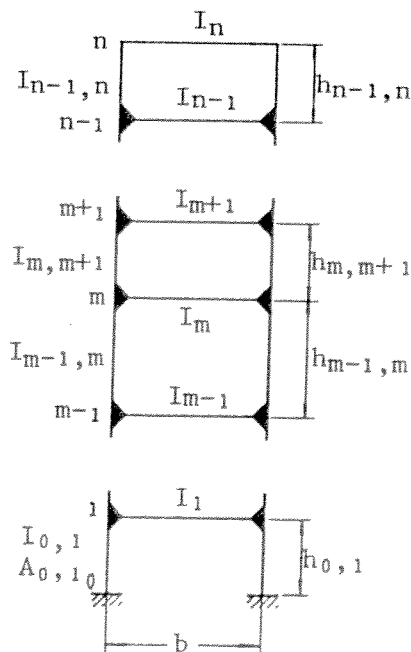


Figura 21

En estas fórmulas $N_{m,m+1}$ es el esfuerzo normal de compresión correspondiente a las columnas del tramo $m,m+1$ (figura 21).

El valor de $\beta_{0,1}$ debe calcularse sucesivamente

a) Para el pórtico real de n pisos.

b) Para $n - 1$ pórticos que se obtienen cada uno de ellos suprimiendo en el pórtico real los i pisos superiores ($i = 1, 2 \dots, n - 1$), pero manteniendo invariables los esfuerzos de compresión en las columnas que quedan.

El mayor de los valores de $\beta_{0,1}$ así obtenidos es el que hay que utilizar para obtener las longitudes de pandeo. El dominio de validez es $\beta_{0,1} \leq 2$.

8.1.3. En el caso de pórticos de un solo piso y varios vanos, con bases empotradas, puede ponerse:

$$\text{en el caso de dos vanos (figura 22 a)} \quad \beta = \frac{1 + 0,4 c_n}{1 + 0,2 c_n} \sqrt{\frac{2 + f}{1 + t}}$$

$$\text{en el caso de tres vanos (figura 22 b)} \quad \beta = \frac{1 + 0,4 c_n}{1 + 0,2 c_n} \sqrt{\frac{1 + f}{1 + t}}$$

$$\text{En ambos casos se tiene } c_n = c + \frac{9}{4} \alpha; \quad c = \frac{I b}{I_0 h}; \quad f = \frac{F_m}{F};$$

$$t = \frac{I_m}{I}; \quad \beta_m = \beta \sqrt{\frac{t}{f}}; \quad \alpha = \frac{4 I}{b^2 A}$$

Campo de validez: $\beta \leq 3$.

Si los pórticos tienen bases articuladas (figura 23) las expresiones precedentes son válidas si en lugar de $\frac{1 + 0,4 c_n}{1 + 0,2 c_n}$, se pone $\frac{6 + 1,2 c_n}{3 + 0,1 c_n}$.

Campo de validez: $\beta \leq 6$.

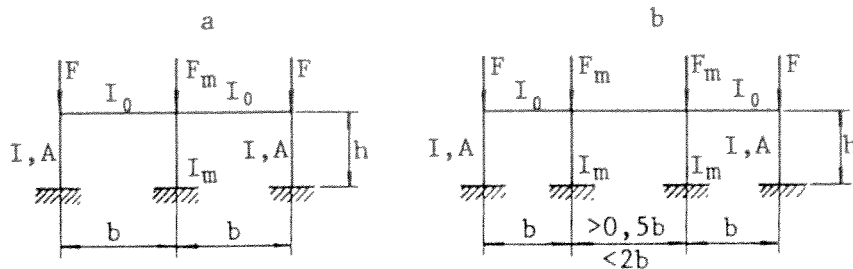


Figura 22

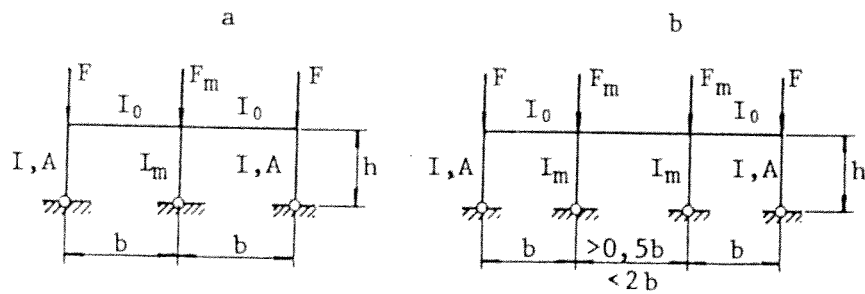


Figura 23

8.1.4. Si un pórtico rectangular aislado, de un solo piso, con articulaciones en los pies de las columnas posee un soporte articulado en sus dos extremos (figura 24 a) cargado con una fuerza vertical

$$F_2 = n \cdot F, \quad (n \leq 2)$$

que mantiene su dirección durante el pandeo, se tiene

$$\beta = \sqrt{1 + 0,48 n} \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (1 + m)} \sqrt{4 + 1,4 \cdot (c + 6\alpha) + 0,02 \cdot (c + 6\alpha)^2}$$

siendo:

$$m = \frac{F_1}{F} \leq 1; \quad c = \frac{I b}{I_0 h} \leq 10; \quad \alpha = \frac{4 I}{b^2 A} \leq 0,2$$

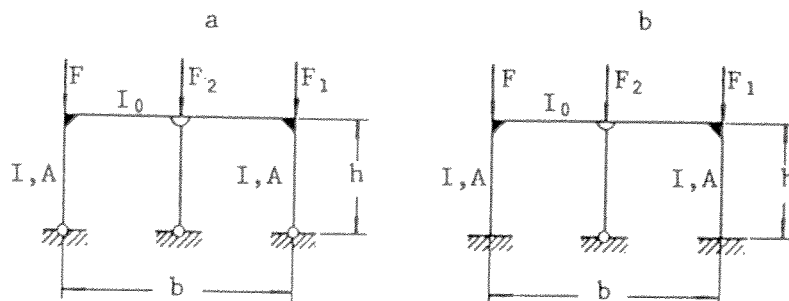


Figura 24

8.1.5. Si un pórtico rectangular aislado, de un solo piso, con los pies de

las columnas empotradas, posee una columna articulada en sus dos extremos (figura 24 b) cargada con una fuerza vertical

$$F_2 = n \cdot F, \quad (n \leq 2)$$

que mantiene su dirección durante el pandeo, se tiene

$$\beta = \sqrt{1 + 0,86 n} \sqrt{\frac{1}{2} (1 + m)} \sqrt{1 + 0,35 (c + 6\alpha) - 0,017 (c + 6\alpha)^2}$$

siendo:

$$m = \frac{F_1}{F} \leq 1; \quad c = \frac{I b}{I_0 h} \leq 10; \quad \alpha = \frac{4 I}{b^2 A} \leq 0,2$$

8.1.6. Si el dintel está cargado con fuerzas verticales que actúan entre los nudos, las columnas resultan solicitadas a compresión y flexión en el plano del pórtico y en consecuencia deberán dimensionarse de acuerdo con el artículo 2.4. del Reglamento CIRSOC 302. El coeficiente de pandeo ω es el que corresponde a una esbeltez λ , que se calcula de acuerdo con las indicaciones de los artículos 8.1.1. a 8.1.5. sobre el coeficiente β .

8.2. LONGITUDES DE PANDEO DE PORTICOS TRIANGULARES

En los pórticos triangulares solicitados en su vértice por una fuerza contenida en el plano del pórtico (figura 25) y que forma con la horizontal un ángulo α , tal que $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$, las secciones de las columnas deben satisfacer la condición

$$\frac{\omega N_1}{A} \leq \sigma_{adm}$$

para evitar el pandeo del pórtico en su propio plano.

siendo:

N_1 el mayor de los esfuerzos de compresión;

ω el coeficiente de pandeo correspondiente a la esbeltez $\lambda = s_K \sqrt{\frac{A}{I}}$ obtenido de las tablas 1 a 6 del Reglamento CIRSOC 302;

$s_K = \beta \cdot s$, la longitud de pandeo de la columna;

$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_F}{\gamma}$ la tensión admisible;

σ_F , γ la tensión de fluencia del acero y el coeficiente de seguridad de la estructura (en el caso de edificios, Reglamento CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios")

A, I , el área y el momento de inercia respecto del eje baricéntrico normal al plano del pórtico, de la sección bruta de la columna;
 β un coeficiente que depende de la relación N_2/N_1 entre los esfuerzos normales de las dos columnas.

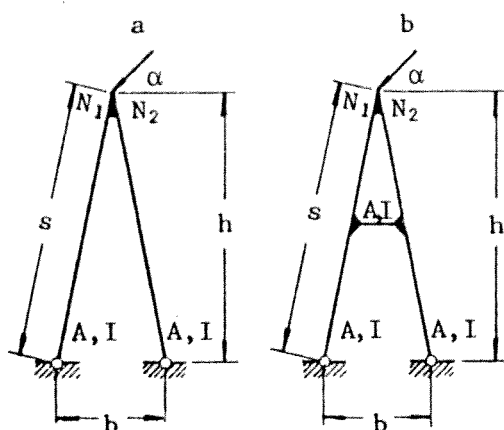


Figura 25

N_2 puede ser positivo (compresión) o negativo (tracción). La relación N_2/N_1 toma valores comprendidos entre los límites -1 , para $\alpha = 0$ (carga horizontal) y 1 para $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (carga vertical). En los pórticos articulados en sus bases, cuando la distancia entre las articulaciones satisface la condición

$$0,3 h \leq b \leq 0,5 h \quad (\text{figura 25 a})$$

se puede poner

$$\beta = 0,80 + 0,05 \left(1 + \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

Si el pórtico está rigidizado por un travesaño situado a mitad de la altura y cuya sección tiene el mismo momento de inercia que el de la sección de las columnas, puede tomarse

$$\beta = 0,44 + 0,12 \cdot \left(1 + \frac{N_2}{N_1} \right) + 0,03 \cdot \left(1 + \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

CAPITULO 9. RECOMENDACIONES AL CAPITULO 5. DEL REGLAMENTO CIRSQC 302

9.1. PANDEO LATERAL DE VIGAS DE SECCION I

9.1.1. Como se ha expresado en el capítulo 5 del Reglamento CIRSQC 302 "Fundamentos de cálculo para los problemas de estabilidad del equilibrio en las estructuras de acero" existe el peligro de pandeo lateral especialmente en las vigas de sección abierta (simplemente conexas), de paredes delgadas y con un eje de simetría (figura 26) cuando la viga está solicitada a flexión en el correspondiente plano de simetría. Esto es válido no solamente para las vigas de eje recto, sino también para aquellas cuyo eje es una curva contenida en el plano de simetría. La capacidad resistente que posee una viga frente al pandeo lateral, con determinadas condiciones de apoyo, es tanto mayor cuanto mayor es la constante de torsión libre I_T , el momento de inercia I_z referido al eje de simetría y el momento sectorial de inercia I_ω . La solución del problema de pandeo lateral es más simple cuando el centro de corte C coincide con el baricentro G de la sección (figura 26 a, h) o cuando $I_\omega \approx 0$ (secciones que no tienen tendencia a alabearse) (figura 26 e, f, g, h).

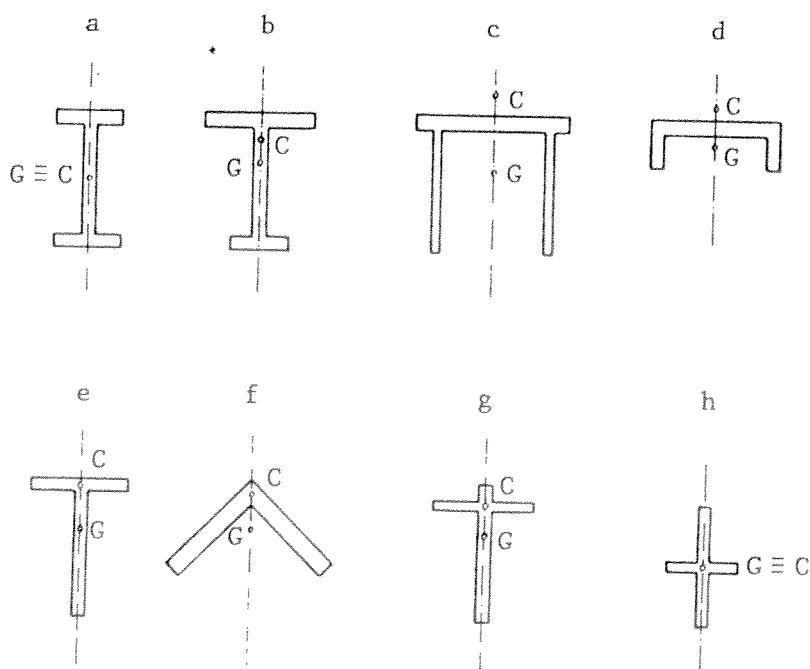


Figura 26

En el estudio del pandeo lateral hay que distinguir el caso de pandeo con eje de torsión libre (ver artículos 9.1.3. y 9.1.5.) del caso de pandeo con eje de torsión no libre, forzado mediante una riostra horizontal (ver artículo 9.1.4.).

9.1.2. Para las vigas con secciones como las de las figuras 28 a y 28 b, se debe efectuar en primer término el cálculo ordinario con teoría de primer orden comprobando que la máxima tensión que se presenta en la viga no supere el máximo valor admisible. En esta verificación de las tensiones se tendrán en cuenta las prescripciones sobre debilitamiento de la sección por agujeros de remaches, los efectos dinámicos y de fatiga.

A continuación hay que llevar a cabo el estudio del pandeo lateral. Debe calcularse con el auxilio de las fórmulas indicadas en los artículos 9.1.3. y 9.1.5., la tensión crítica ideal de pandeo lateral σ_{Ki} (que es la mayor tensión de compresión que se produce en la línea media del ala bajo la acción de la carga crítica ideal de pandeo lateral). Además, debe obtenerse de la tabla 11 o de la figura 20 del Reglamento CIRSOC 302 la tensión crítica reducida σ_K (en este caso es $\sigma_{VKi} \equiv \sigma_{Ki}$ y $\sigma_{VK} \equiv \sigma_K$) y ha de calcularse el coeficiente de seguridad al pandeo lateral.

$$\gamma_K = \frac{\sigma_K}{\max \sigma} = \frac{\sigma_K I_y}{a \max M}$$

siendo:

- I_y el momento de inercia de la sección bruta de la viga respecto del eje principal y;
- a la distancia al eje de la viga de la línea media del ala comprimida (figura 28);
- $\max M$ el momento flexor máximo que se origina en la viga, calculado teniendo en cuenta los efectos dinámicos, sin considerar los efectos de fatiga.

El coeficiente de seguridad γ_K así calculado no debe ser menor que $\frac{8}{7} \gamma$, donde γ es el coeficiente de seguridad para el cálculo de la estructura de acuerdo con los reglamentos correspondientes (en el caso de edificios, CIRSOC 301 "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios").

9.1.3. En las ménsulas de sección I constante, con dos ejes de simetría (figura 28 b) se puede obtener la tensión crítica ideal por medio de la fórmula

$$\sigma_{Ki} = \frac{ka}{I_{y1}} \sqrt{E \cdot I_z \cdot G \cdot I_T}$$

siendo:

- l la longitud de la ménsula;
- h la distancia entre las líneas medias de ambas alas;
- $I_z = 2 \frac{t_1 b_1^3}{12}$ el momento de inercia de la sección respecto del eje z;
- $I_T = \frac{1}{3} (2 b_1 t_1^3 + h t_3^3)$ la constante de torsión libre de la sección;
- $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$ ($210\,000 \text{ kgf/cm}^2$) el módulo de elasticidad longitudinal;
- $G = 81\,000 \text{ N/mm}^2$ ($81\,000 \text{ kgf/cm}^2$) es el módulo de elasticidad transversal;
- k un coeficiente que depende del parámetro adimensional

$$\chi = \frac{E I_z}{G I_T} \left(\frac{h}{2 l} \right)^2$$

Para los tres casos de sollicitación representados en las figuras 27 a, b, c, en los que se supone que en la sección empotrada el alabeo está impedido y que es libre en el otro extremo de la ménsula, el valor de k puede tomarse de la figura 27 d. La curva k_1 corresponde a la ménsula sollicitada en su extremo libre por un momento cuyo vector representativo permanece horizontal y se mantiene en el plano de la sección extrema durante el pandeo (figura 27 a).

Las curvas k_2 , k_3 , k_4 corresponden a una ménsula sollicitada en su extremo libre por una fuerza concentrada vertical que conserva su dirección durante el pandeo (figura 27 b); se utilizará k_2 cuando la carga actúe en el baricentro de la sección y k_3 o k_4 cuando actúe en el baricentro del ala superior o de la inferior, respectivamente. Las curvas k_5 y k_6 corresponden a una ménsula sollicitada por cargas verticales uniformemente distribuidas que se conservan verticales durante el pandeo (figura 27 c); se utilizará k_5 cuando las cargas actúen en el eje de la viga y k_6 cuando actúen en el eje del ala superior de la viga. Para cargas concentradas o uniformemente distribuidas que actúan en posiciones intermedias entre el eje de la viga y el eje del ala superior o el de la inferior, se puede obtener k por interpolación entre k_2 y k_3 o k_4 o entre k_5 y k_6 .

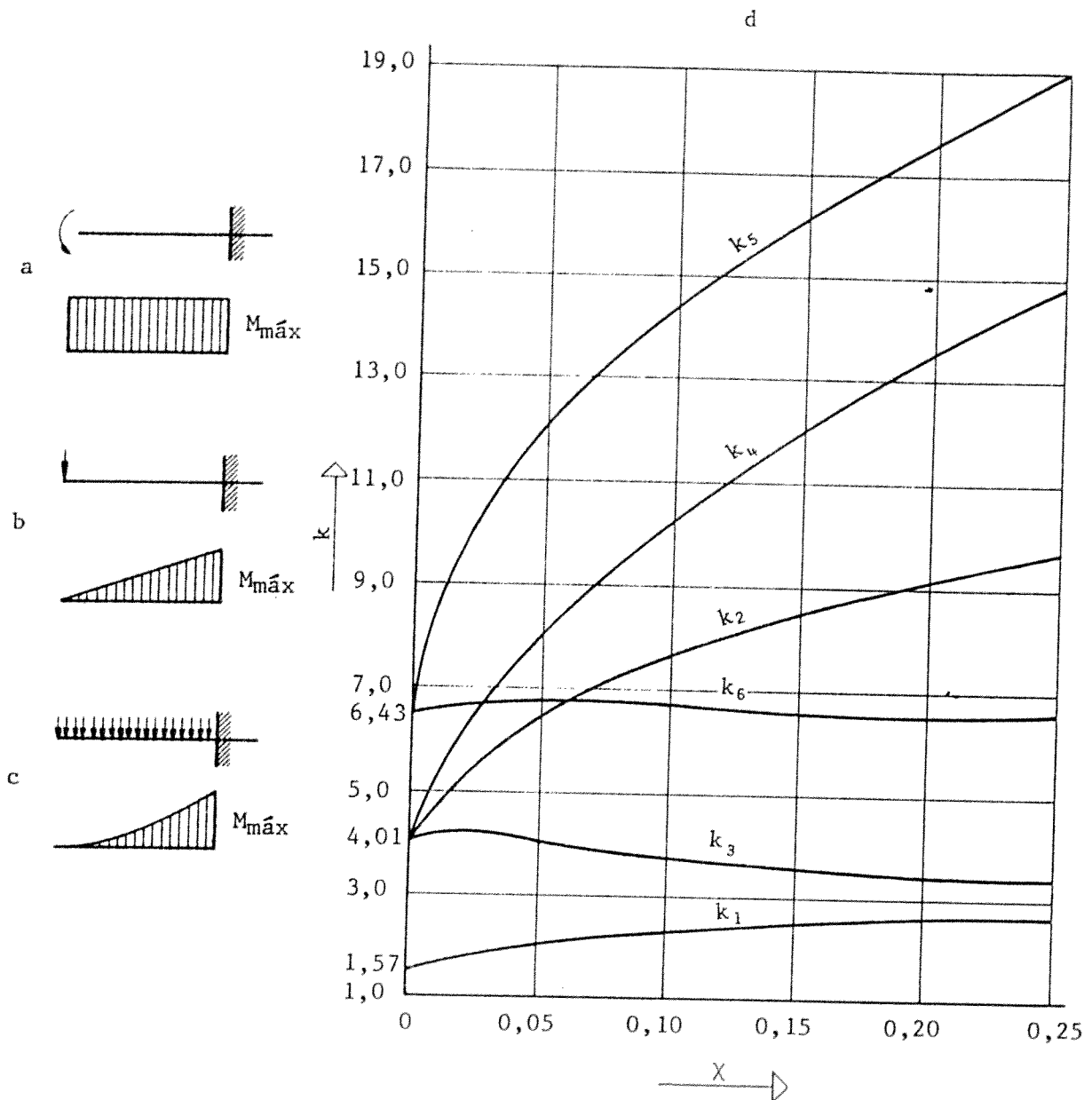
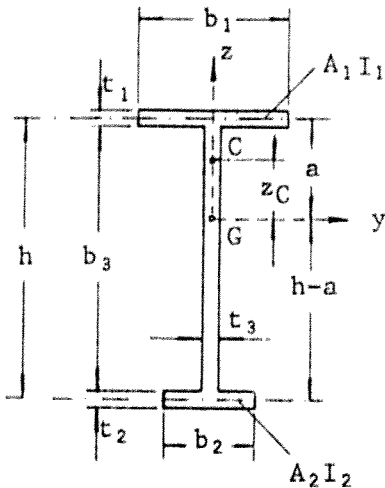


Figura 27

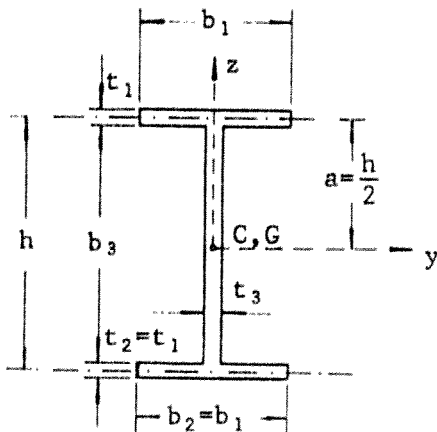
9.1.4. En las vigas de sección I con dos ejes de simetría (figura 28 b) solicitadas por cargas uniformemente distribuidas en toda su longitud y apoyadas en sus extremos de modo que queden impedidos los desplazamientos y giros de las secciones extremas en sus propios planos, pero sean libres los giros respecto de los ejes de simetría de la sección y los desplazamientos en la dirección del eje de la viga y que además esté impedida de desplazarse lateralmente por un arriostramiento longitudinal vinculado mediante una articulación (figura 14), puede calcularse también la tensión crítica σ_{k_i} con la fórmula

mula del artículo 9.1.3.

a)



b)



c)

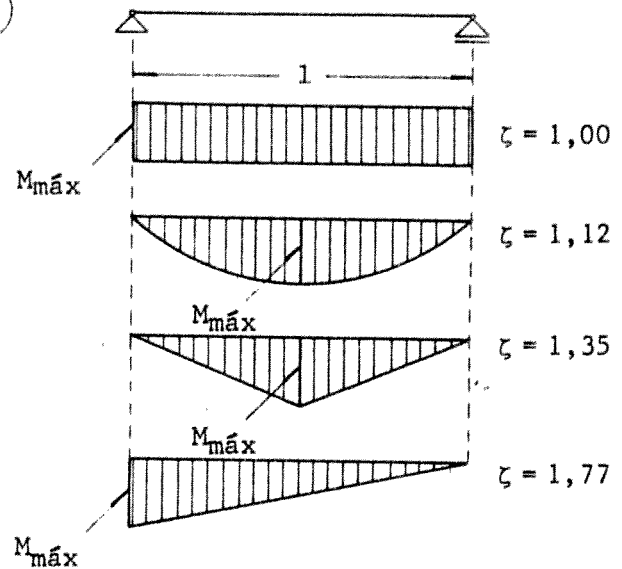


Figura 28

Para el coeficiente k puede tomarse aproximadamente en este caso,

$$k = \frac{\frac{1}{\sqrt{X}} + \pi^2 \sqrt{X} \left[1 + \left(\frac{2f}{h} \right)^2 \right]}{0,81 \left(\frac{2d}{h} \right) - 1,74 \left(\frac{2f}{h} \right)}$$

En donde X debe calcularse con la expresión dada en el artículo 9.1.3.; d representa la distancia entre la línea donde está aplicada la carga uniformemente distribuida y el eje baricéntrico de la viga, con signo positivo cuando la línea donde está aplicada la carga aludida está más arriba que el eje baricéntrico (del lado del borde comprimido), f es la distancia entre el

plano del arriostramiento longitudinal y el eje baricéntrico de la viga, con signo positivo cuando dicho arriostramiento está más arriba que el eje baricéntrico (del lado del borde comprimido); para una viga que está cargada sobre el ala superior y que está impedida de desplazarse lateralmente en correspondencia con el ala inferior es $d = + h/2$ y $f = - h/2$. En caso en que $f > 0,47 d$, no existe, según esta fórmula, posibilidad de pandeo lateral. Para las fases de la construcción en las cuales el arriostramiento longitudinal no es plenamente eficaz, se deben efectuar las verificaciones pertinentes frente al peligro de pandeo lateral.

9.1.5. La tensión crítica ideal de pandeo lateral de una viga de sección constante con un solo eje de simetría (figura 28 a), cuyas secciones extremas están empotradas elásticamente con respecto a los giros alrededor del eje z, su alabeo restringido elásticamente en la misma medida y los giros y desplazamientos en sus propios planos totalmente impedidos, puede calcularse aproximadamente con la fórmula

$$\sigma_{Ki} = \frac{\zeta \cdot N_{Ki} \cdot a}{I_y} \left[\sqrt{\left(\frac{5d}{\kappa} + \frac{r_y}{3} - z_C \right)^2 + i_T^2} - \left(\frac{5d}{\kappa} + \frac{r_y}{3} - z_C \right) \right]$$

En el caso de una sección I con dos ejes de simetría (figura 28 b), es

$$r_y = 0; \quad z_C = 0; \quad I_\omega = \frac{I_1 h^2}{2} = \frac{I_z h^2}{4}$$

y la tensión crítica,

$$\sigma_{Ki} = \frac{\zeta \cdot N_{Ki} \cdot h}{2 I_y} \left[\sqrt{\left(\frac{5d}{\kappa} \right)^2 + i_T^2} - \frac{5d}{\kappa} \right]$$

siendo:

$\kappa = \frac{\pi^2}{\beta^2}$ un coeficiente a elegir, de acuerdo con el artículo 4.4.2.2., comprendido entre π^2 y $4\pi^2$ que depende del grado de empotramiento elástico con respecto a los giros alrededor del eje z;

$N_{Ki} = \frac{\kappa \cdot E \cdot I_z}{l^2}$ la carga crítica de Euler, correspondiente al pandeo por flexión en el plano horizontal normal al alma, supuesta una compresión ideal de la viga;

l la luz de la viga;

d la distancia entre la línea (o el punto) de aplicación de las cargas verticales y el eje baricéntrico de la viga con signo positivo cuando las cargas están aplicadas más arriba que el eje baricéntrico. Si las cargas actúan en el ala superior o inferior es $d = + h/2$

- o $d = -h/2$ respectivamente, Si las cargas actúan sobre el eje de la viga o son nulas, es $d = 0$;
- ζ un coeficiente que depende de la distribución de momentos flexores a lo largo de la viga, que puede estimarse aproximadamente, en base a los valores dados en la figura 28 c;
- r_y debe calcularse de acuerdo con las indicaciones del artículo 5.1.2. y z_C e i_T según lo indicado en los artículos 4.4.2. y 4.4.2.2.

