

# 12

## Corte

### ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002

Los cambios introducidos en la edición 2002 del código incluyen los siguientes:

1. En el artículo 11.11.1 se hace referencia al Apéndice A, Modelos de Bielas y Tirantes. Esto permite el uso de los nuevos requisitos del Apéndice para el diseño al corte de las regiones perturbadas.
2. Se revisaron los requisitos de armadura mínima de corte para elementos de hormigón cuya resistencia a la compresión es mayor que 10.000 psi. El artículo 11.1.2.1 refiere a los artículos revisados 11.5.5.3 y 11.5.5.4 para las áreas mínimas de armadura de corte.
3. Se revisó el área de armadura mínima de corte, tanto para elementos pretensados como para elementos no pretensados, la cual ahora es función de la resistencia a la compresión del hormigón.

### CONSIDERACIONES GENERALES

La naturaleza relativamente abrupta de las fallas "por corte," en comparación con las fallas dúctiles por flexión, hacen que sea deseable diseñar los elementos de manera que la resistencia bajo solicitaciones de corte sea igual o mayor que la resistencia bajo solicitaciones de flexión. Para asegurar una falla frágil por flexión, el código (1) establece requisitos mínimos y máximos para la cantidad de armadura longitudinal y (2) requiere un mínimo de armadura de corte en todos los elementos solicitados a flexión cuando el esfuerzo de corte mayorado,  $V_u$ , es mayor que un medio de la resistencia al corte proporcionada por el hormigón ( $V_u > 0,5\phi V_c$ ), excepto para ciertos tipos de construcciones (11.5.5.1).

La determinación de la cantidad de armadura de corte se basa en una forma modificada de la analogía del reticulado. La analogía del reticulado asume que la armadura de corte resiste la totalidad del corte transversal. Se han realizado numerosas investigaciones sobre este tema, las cuales indican que se puede suponer que la resistencia al corte proporcionada por el hormigón,  $V_c$ , es igual al corte que provoca fisuración inclinada; por este motivo la armadura se debe diseñar para soportar solamente el exceso de corte.

En la Parte 12 se considera el diseño al corte de elementos no pretensados en los cuales la relación entre la luz libre y la altura total es mayor que 4. También se incluye el diseño para corte horizontal de elementos de hormigón compuestos solicitados a flexión, que se trata separadamente en la segunda mitad de la Parte 12. En la Parte 17 se presenta el diseño al corte de los elementos de gran altura solicitados a flexión. En la Parte 25 se discute el diseño al corte de los elementos pretensados. En la Parte 32 se discute el método alternativo de diseño al corte del Apéndice A, Modelos de Bielas y Tirantes.

## 11.1 RESISTENCIA AL CORTE

Los requisitos para el diseño al corte se presentan en términos de las fuerzas de corte (no de las tensiones de corte), de modo de ser compatibles con las demás condiciones de diseño del método de diseño por resistencia, las cuales se expresan en términos de cargas, momentos y fuerzas.

En consecuencia, el corte se expresa en términos del esfuerzo de corte mayorado,  $V_u$ , usando el requisito básico de resistencia al corte:

Resistencia al corte de diseño  $\geq$  Resistencia al corte requerida

$$\phi V_n \geq V_u \quad \text{Ec. (11-1)}$$

La resistencia nominal al corte,  $V_n$ , se calcula como:

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{Ec. (11-2)}$$

donde  $V_c$  es la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón y  $V_s$  es la resistencia nominal al corte proporcionada por la armadura de corte.

Se puede sustituir la Ecuación (11-2) en la Ecuación (11-1), luego de lo cual se obtiene:

$$\phi V_c + \phi V_s \geq V_u$$

La resistencia al corte requerida en una sección se calcula usando las Ecuaciones (11-1) y (11-2), para las cuales  $V_u$  se obtiene aplicando los factores de mayoración de las cargas especificados en el artículo 9.2. El factor de reducción de la resistencia ( $\phi = 0,75$ ) se especifica en el artículo 9.3.2.3.

### 11.1.1.1 Aberturas en el alma de un elemento

A menudo es necesario modificar los elementos estructurales para acomodar los sistemas mecánicos y eléctricos. Hacer que los servicios pasen a través de aberturas en las almas de las vigas de entrepiso dentro del paquete entrepiso-cielorraso elimina una importante cantidad de espacio muerto y permite obtener un diseño más económico. Sin embargo, se debe considerar el efecto de las aberturas sobre la resistencia al corte de las vigas de entrepiso, especialmente si estas aberturas están ubicadas en las regiones de corte elevado próximas a los apoyos. El artículo 11.1.1.1 del código requiere que el diseñador considere el efecto de las aberturas sobre la resistencia al corte de los elementos. Debido a la gran cantidad de variables involucradas, tales como la geometría, el tamaño y la ubicación relativa de las aberturas, no se establecen requisitos de diseño específicos. Sin embargo, en R11.1.1.1 se presenta bibliografía que contiene lineamientos para el diseño. En general, es aconsejable colocar estribos verticales adicionales adyacentes a ambos lados de las aberturas, excepto si se trata de aberturas pequeñas y aisladas. La armadura de corte adicional se puede dimensionar para que soporte el esfuerzo de corte total en la sección donde está ubicada la abertura. El Ejemplo 12.5 ilustra la aplicación de un método de diseño recomendado en la Referencia 12.1.

### 11.1.2 Límite para $\sqrt{f'_c}$

Las ecuaciones para la resistencia al corte del hormigón presentadas en el Capítulo 11 del Código dependen de  $\sqrt{f'_c}$ , y han sido verificadas experimentalmente para elementos de hormigón con resistencias de hasta 10.000 psi. Debido a la falta de datos disponibles sobre elementos con  $f'_c > 10.000$  psi, el artículo 11.1.2 limita el valor de  $\sqrt{f'_c}$  a 100 psi, excepto en el caso indicado en el artículo 11.1.2.1.

El artículo 11.1.2 no prohíbe el uso de hormigones con  $f'_c > 10.000$  psi; simplemente le advierte al diseñador que no debe considerar ninguna resistencia mayor que 10.000 psi al calcular  $V_c$ , a menos que provea la mínima armadura de corte de acuerdo con 11.1.2.1.

Se debe tener en cuenta que antes del Código 2002 el área mínima de armadura transversal era independiente de la resistencia del hormigón. Sin embargo, ensayos recientes han demostrado que en los elementos de hormigón de alta resistencia es necesario aumentar la armadura transversal mínima, con el objeto de impedir fallas bruscas por corte cuando se produce fisuración inclinada. Por lo tanto, para considerar esta situación, los requisitos de armadura transversal mínima ahora dependen de  $\sqrt{f'_c}$ .

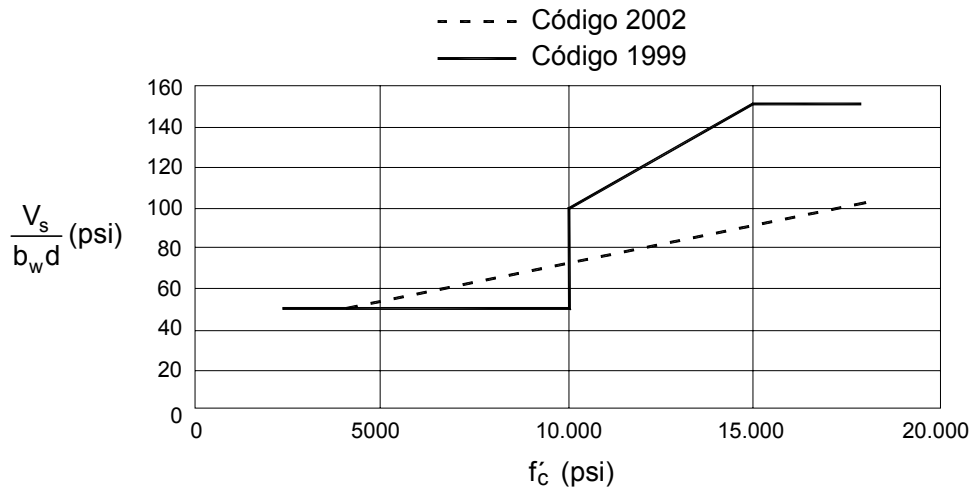


Figura 12-1 – Requisito de armadura mínima de corte de acuerdo con la Ecuación (11-3)

La Figura 12-1 ilustra el requisito de armadura mínima de corte de acuerdo con el artículo 11.5.5.3 y la Ecuación (11-13) según los Códigos de 1999 y 2002. Como se puede ver en esta figura, la Ecuación (11-13) del Código 2002 considera un aumento gradual del área mínima de armadura de corte, manteniendo el mismo valor mínimo del Código 1999.

### 11.1.3 Cálculo del máximo esfuerzo de corte mayorado

El artículo 11.1.3 describe tres condiciones que se deben satisfacer para poder calcular el máximo esfuerzo de corte mayorado,  $V_u$ , de acuerdo con 11.1.3.1 para elementos no pretensados:

1. La reacción en el apoyo, en la dirección del esfuerzo de corte aplicado, introduce compresión en las regiones de los extremos del elemento.
2. Las cargas se aplican en la parte superior del elemento o cerca de la parte superior del elemento.
3. No hay cargas concentradas entre el borde del apoyo y la ubicación de la sección crítica, la cual está a una distancia  $d$  medida a partir del borde del apoyo (11.1.3.1).

Cuando se satisfacen las condiciones del artículo 11.1.3, está permitido diseñar las secciones del elemento ubicadas a una distancia menor que  $d$  medida a partir del borde del apoyo para el esfuerzo de corte  $V_u$  calculada a esta distancia  $d$  medida a partir del borde del apoyo. En las Figuras 12-2(a), (b) y (c) se ilustran ejemplos de condiciones de apoyo típicas para las cuales el artículo 11.1.3 sería aplicable.

Las condiciones en las cuales no se puede aplicar el artículo 11.1.3 incluyen: (1) elementos aporticados por un elemento en tracción (ver Figura 12-2(d)); (2) elementos cargados cerca de la parte inferior (ver Figura 12-2(e)); y (3) elementos cargados de forma tal que el corte en la cara del apoyo difiere sustancialmente del corte a una distancia  $d$  del borde del apoyo (Figura 12-2(f)). En todos estos casos la sección de corte crítico se debe tomar en la cara del apoyo. Además, en el caso de la Figura 12-2(d), se debe investigar el corte dentro del nudo y se debería proveer armadura especial en las esquinas.

Hay otra condición de apoyo que vale la pena mencionar. Para las ménsulas y cartelas, se debe considerar el corte en la cara del apoyo,  $V_u$ , como se ilustra en la Figura 12-3. Sin embargo, es mejor diseñar estos elementos al corte usando los requisitos de corte por fricción de 11.7. Ver la Parte 15 para el diseño de ménsulas y cartelas.

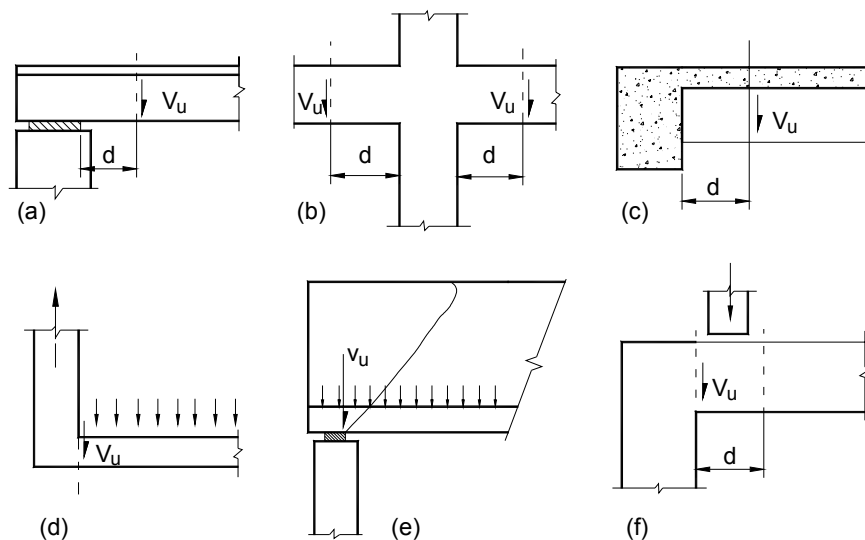


Figura 12-2 – Condiciones de apoyo típicas, con la ubicación del esfuerzo de corte mayorado,  $V_u$

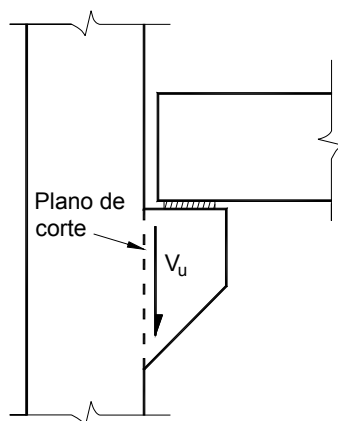


Figura 12-3 – Plano de corte crítico para ménsulas y cartelas

## 11.2 HORMIGÓN LIVIANO

Debido a que la resistencia al corte del hormigón liviano puede ser menor que la del hormigón de peso normal de igual resistencia a la compresión, es necesario ajustar el valor de  $V_c$  calculado para hormigón de peso normal.

Con excepción de los artículos 11.5.4.3, 11.5.6.9, 11.6.3.1, 11.12.3.2 y 11.12.4.8, cuando se especifica la resistencia promedio a la tracción por compresión diametral,  $f_{ct}$ , en todas las Ecuaciones del Capítulo 11  $\sqrt{f'_c}$  se debe reemplazar por  $f_{ct}/6,7$ . Sin embargo, el valor  $f_{ct}/6,7$  no se puede tomar mayor que  $\sqrt{f'_c}$ . Cuando no se especifica  $f_{ct}$ , todos los valores de  $\sqrt{f'_c}$  se deben multiplicar por 0,75 para hormigón de agregados livianos, o por 0,85 para hormigón de agregados livianos y arena de densidad normal. Cuando hay reemplazo parcial con arena se permite interpolar linealmente entre estos valores.

### 11.3 RESISTENCIA AL CORTE PROPORCIONADA POR EL HORMIGÓN EN LOS ELEMENTOS NO PRETENSADOS

Cuando se calcula la resistencia al corte proporcionada por el hormigón en elementos solicitados exclusivamente a corte y flexión, el diseñador puede optar por usar la ecuación simplificada,  $V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d$  (Ecuación 11-3), o bien la expresión más elaborada dada en la Ecuación (11-15). Si se calcula  $V_u$  mediante la Ecuación (11-5), se debe observar que  $V_u$  y  $M_u$  son los valores que ocurren simultáneamente en la sección considerada. Se prescribe un valor máximo de 1,0 para la relación  $V_u d / M_u$  para limitar  $V_c$  cerca de los puntos de inflexión donde  $M_u$  es muy pequeño o nulo.

Para los elementos solicitados a corte y flexión con compresión axial, el artículo 11.3.1.2 contiene una expresión simplificada para calcular  $V_c$ , y en 11.3.2.2 hay una expresión opcional más elaborada. Para los elementos solicitados a corte, flexión y tracción axial significativa, el artículo 11.3.1.3 requiere proveer armadura de corte para resistir la totalidad del corte a menos que se realice el análisis más detallado indicado en 11.3.2.3. Observar que en la Ecuación (11-8)  $N_u$  representa una fuerza de tracción, y por lo tanto se debe considerar negativa.

El Código no incluye una definición precisa del término "tracción axial significativa." Si existe alguna duda respecto de la magnitud de la tracción axial, puede ser aconsejable tomar todo el corte aplicado mediante armadura de corte.

La Figura 12-4 ilustra la variación de la resistencia al corte proporcionada por el hormigón,  $V_c$ , en función de  $\sqrt{f'_c}$ ,  $V_u d / M_u$  y la cuantía de armadura  $\rho_w$ .

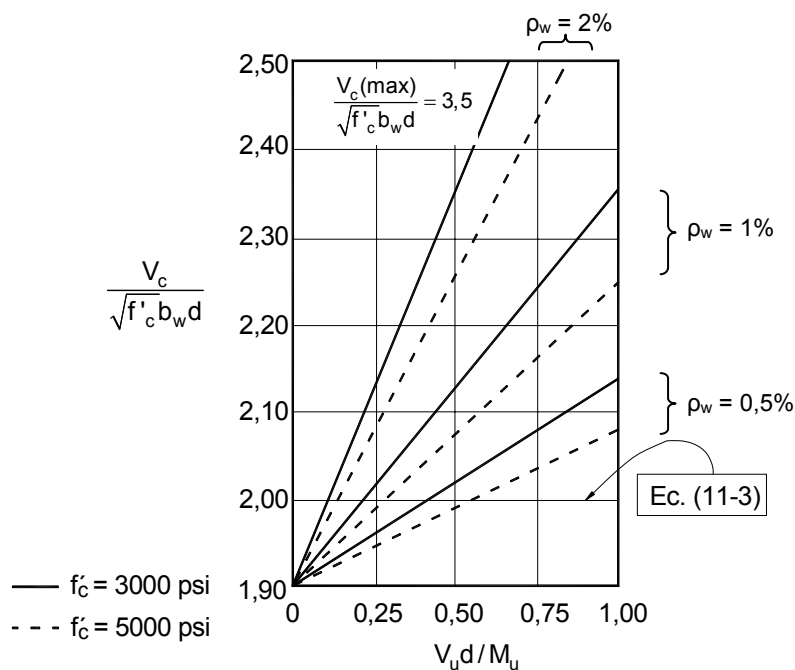


Figura 12-4 – Variación de  $\frac{V_c}{\sqrt{f'_c} b_w d}$  en función de  $f'_c$ ,  $\rho_w$  y  $\frac{V_u d}{M_u}$  usando la Ecuación (11-5)

La Figura 12-5 muestra el rango aproximado de los valores de  $V_c$  para secciones bajo compresión axial, obtenidos de acuerdo con las Ecuaciones (11-5) y (11-6). Los valores corresponden a una viga de  $6 \times 12$  in. con una profundidad o altura efectiva de 10,8 in. También se indican las curvas correspondientes a las expresiones alternativas para  $V_c$  dadas por las Ecuaciones (11-4) y (11-7), así como las correspondientes a la Ecuación (11-8).

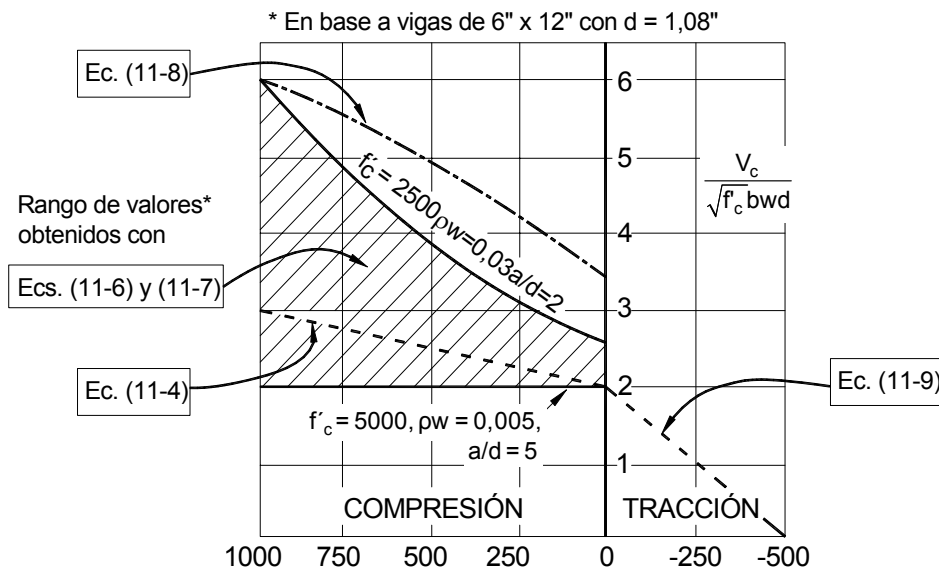


Figura 12-5 – Comparación de las ecuaciones de diseño para un elemento solicitado a corte y carga axial

La Figura 12-6 ilustra la variación de  $V_c$  en función de  $N_u/A_g$  y  $f'_c$  para secciones solicitadas a compresión axial, en base a la Ecuación (11-4). Para el rango de valores de  $N_u/A_g$  indicado,  $V_c$  varía entre aproximadamente 49% y 57% del valor de  $V_c$  definido por la Ecuación (11-7).

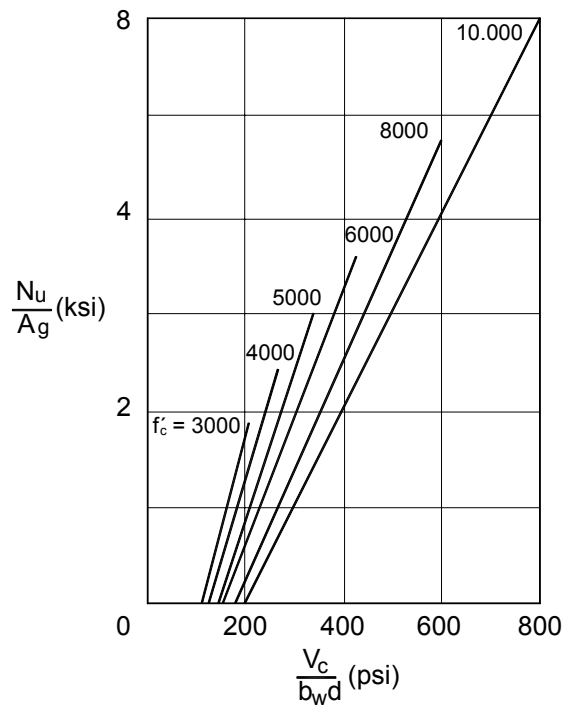


Figura 12-6– Variación de  $\frac{V_c}{b_w d}$  en función de  $f'_c$  y  $\frac{N_u}{A_g}$  usando la Ecuación (11-4)

## 11.5 RESISTENCIA AL CORTE PROPORCIONADA POR LA ARMADURA DE CORTE

### 11.5.1 Tipos de armadura de corte

En la Figura 12-7 se ilustran diferentes tipos y disposiciones de armadura de corte permitidos por los artículos 11.5.1.1 y 11.5.1.2. A partir del Código 1999, los zunchos, estribos circulares o estribos cerrados se reconocen explícitamente como tipos de armadura de corte. Los estribos inclinados y las barras longitudinales dobladas no se usan mucho debido a que requieren cuidados especiales durante su colocación en obra.

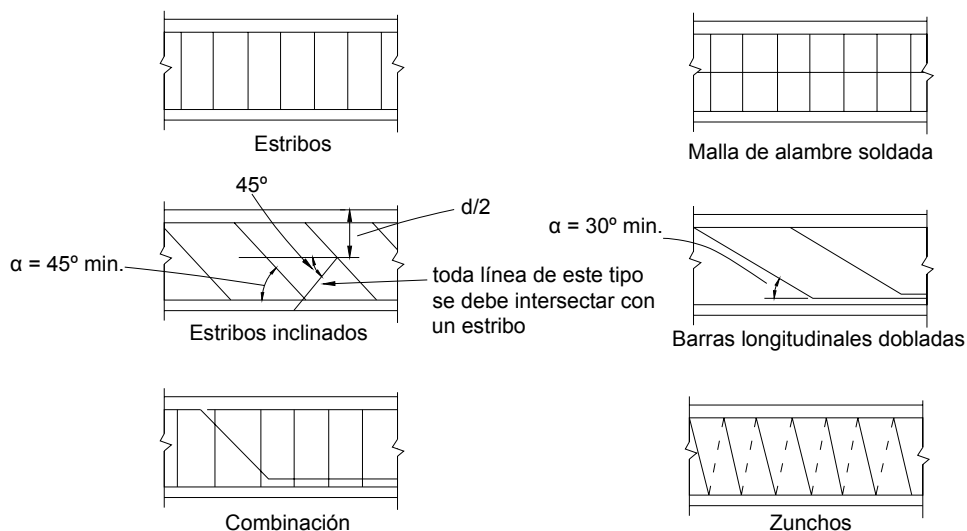


Figura 12-7 – Tipos y disposiciones de armadura de corte

### 11.5.3 Detalles de anclaje de la armadura de corte

Para que sea totalmente efectiva, la armadura de corte se debe extender en una distancia tan próxima a la profundidad total del elemento como lo permitan los requisitos de recubrimiento y la proximidad de otras armaduras (12.13.1), y se debe anclar en ambos extremos para desarrollar la tensión de fluencia de diseño de la armadura de corte. Se asume que los detalles de anclaje especificados en el artículo 12.13 satisfacen este requisito de desarrollo.

### 11.5.4 Límites de separación de la armadura de corte

La separación de los estribos y alambres (individuales o que forman parte de una malla de alambre soldada) usados como armadura de corte, ubicados en forma perpendicular al eje del elemento, no debe ser mayor que un medio de la profundidad efectiva del elemento ( $d/2$ ) ni mayor que 24 in. Cuando se verifique que  $\phi V_s = (V_u - \phi V_c)$  es mayor que  $\phi 4\sqrt{f'_c} b_w d$ , la separación se debe reducir a la mitad, es decir, ( $d/4$ ) ó 12 in. Observar también que el valor de  $(\phi V_s)$  no debe ser mayor que  $\phi 8\sqrt{f'_c} b_w d$  (11.5.6.9). Para situaciones en las cuales la resistencia al corte requerida es mayor que este límite, se pueden aumentar las dimensiones del elemento o la resistencia del hormigón para que aumente la resistencia al corte proporcionada por el hormigón.

### 11.5.5 Armadura mínima de corte

Cuando el esfuerzo de corte mayorado es mayor que la mitad de la resistencia al corte proporcionada por el hormigón ( $V_u > \phi V_c/2$ ), se debe colocar un área mínima de armadura de corte en los elementos solicitados a flexión, excepto en el caso de las

losas y zapatas, las losas nervuradas definidas en 8.11, y las vigas de gran ancho y poca altura (11.5.5.1). Cuando se requiera, la armadura mínima de corte para los elementos no pretensados será:

$$A_v = 0,75\sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_y} \quad \text{Ec. (11-13)}$$

pero nunca menor que  $A_v = \frac{50b_w s}{f_y}$

En el Código 2002, la armadura mínima de corte depende ahora de la resistencia a la compresión del hormigón. Con la Ecuación (11-13) se obtiene un aumento gradual de la  $A_v$  mínima requerida, pero se mantiene el valor mínimo anterior igual a  $50b_w s/f_y$ .

Observar que la separación de la armadura mínima de corte no debe ser mayor que  $d/2$  ni mayor que 24 in.

### 11.5.6 Determinación de la armadura de corte

Cuando el esfuerzo de corte mayorado,  $V_u$ , es mayor que la resistencia al corte proporcionada por el hormigón,  $\phi V_c$ , se debe colocar armadura de corte para soportar el exceso de corte. El Código contiene una expresión que define la resistencia al corte requerida proporcionada por la armadura  $V_s$  en términos del área  $A_v$ , la tensión de fluencia  $f_y$  y la separación  $s$  de la armadura de corte [Ecuación (11-15)]. La expresión se basa en un reticulado en el cual las diagonales comprimidas están inclinadas un ángulo de 45 grados.

Para asegurar la correcta aplicación del factor de reducción de la resistencia,  $\phi$ , a continuación se desarrollan expresiones para calcular directamente la armadura de corte requerida,  $A_v$ . En el caso de armadura de corte dispuesta perpendicular al eje del elemento, para determinar el área de armadura de corte requerida,  $A_v$ , para una separación  $s$ , se puede usar el siguiente método:

$$\phi V_n \geq V_u \quad \text{Ec. (11-1)}$$

donde  $V_n = V_c + V_s \quad \text{Ec. (11-2)}$

y  $V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad \text{Ec. (11-15)}$

Reemplazando  $V_s$  en la Ecuación (11-2) y  $V_n$  en la Ecuación (11-1) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\phi V_c + \frac{\phi A_v f_y d}{s} \geq V_u$$

Resolviendo para  $A_v$ ,

$$A_v = \frac{(V_u - \phi V_c)s}{\phi f_y d}$$

De manera similar, cuando se usan estribos inclinados,

$$A_v = \frac{(V_u - \phi V_c)s}{\phi f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) d}$$

donde  $\alpha$  es el ángulo comprendido entre el estribo inclinado y el eje longitudinal del elemento (ver Figura 12-7).



Cuando la armadura de corte consiste en una barra individual o en un solo grupo de barras paralelas, todas dobladas a la misma distancia del apoyo,

$$A_v = \frac{(V_u - \phi V_c)}{f_y \sin \alpha}$$

donde  $\alpha$  es el ángulo formado por el tramo doblado y el eje longitudinal del elemento, pero no es menor que 30 grados (ver Figura 12-7). En este caso, el valor  $(V_u - \phi V_c)$  no debe ser mayor que  $\phi 3\sqrt{f'_c} b_w d$ .

## Procedimiento de diseño para la armadura de corte

Para diseñar al corte una viga de hormigón no pretensado se deben seguir los siguientes pasos:

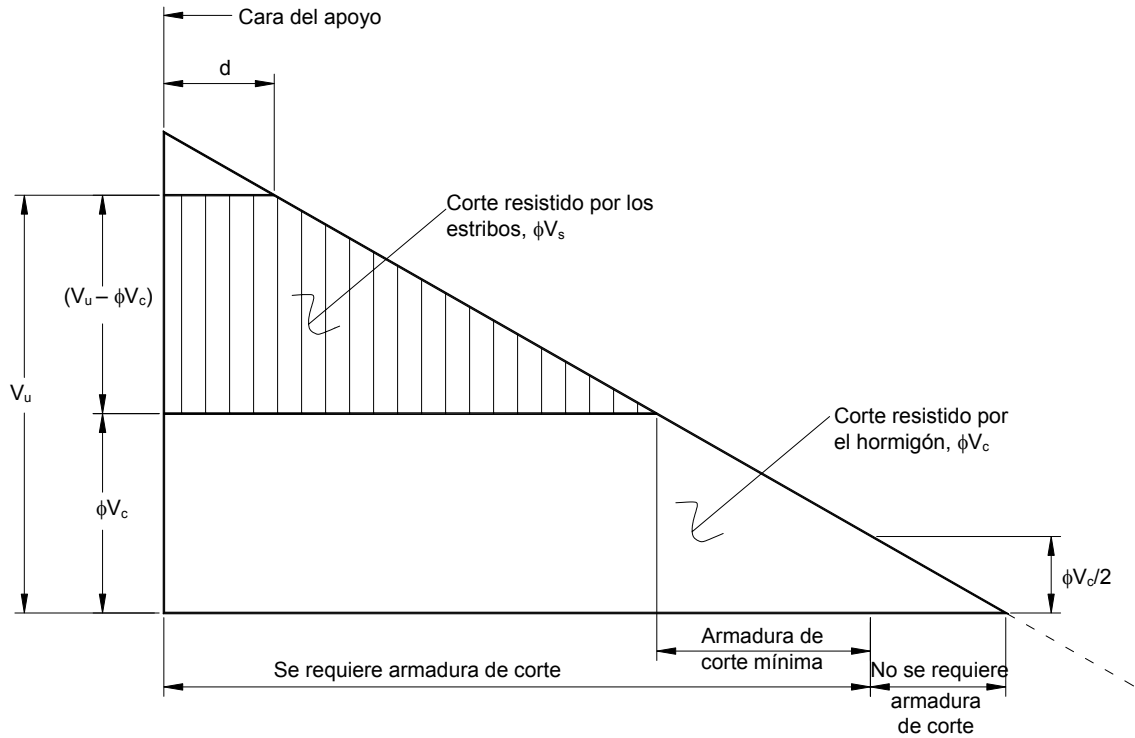
1. Determinar el máximo esfuerzo de corte mayorado,  $V_u$ , en las secciones críticas del elemento de acuerdo con el artículo 11.1.3 (ver Figura 12-2).
2. Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón,  $\phi V_c$ , usando la Ecuación (11-3):  $\phi V_c = \phi 2\sqrt{f'_c} b_w d$ , donde  $\phi = 0,75$  (9.3.2.3).
3. Calcular  $(V_u - \phi V_c)$  en la sección crítica. Si  $V_u - \phi V_c > \phi 8\sqrt{f'_c} b_w d$ , aumentar las dimensiones de la sección transversal o la resistencia a la compresión del hormigón.
4. Calcular la distancia a partir del apoyo más allá de la cual se requiere armadura mínima de corte (es decir donde  $V_u = \phi V_c$ ) y la distancia a partir del apoyo más allá de la cual el hormigón puede resistir la totalidad del esfuerzo de corte (es decir donde  $V_u = \phi V_c / 2$ ).
5. Usar la Tabla 12-1 para determinar el área de estribos verticales requerida  $A_v$  o la separación  $s$  en algunas secciones determinantes a lo largo la longitud del elemento, incluyendo las secciones críticas.

Si es necesario utilizar estribos, en general resulta más práctico seleccionar un tipo y tamaño de barra (por ejemplo, estribos No. 3 en U (de 2 ramas)) y determinar la separación requerida. Habitualmente colocar estribos de mayor tamaño más separados es más eficiente desde el punto de vista de los costos que colocar estribos más pequeños y menos separados, ya que en este último caso los costos de fabricación y colocación son desproporcionadamente elevados. Otra manera de ahorrar es variar la separación entre estribos tan pocas veces como sea posible en la longitud del elemento. Si fuera posible, se deberían especificar no más de tres separaciones diferentes, ubicando el primer estribo a 2 in. de la cara del apoyo.

**Tabla 12-1 – Requisitos para el diseño al corte**

		$V_u \leq \phi V_c / 2$	$\phi V_c \geq V_u > \phi V_c / 2$	$V_u > \phi V_c$
Área de estribos requerida		Ninguna	$0,75\sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_y} \geq \frac{50b_w s}{f_y}$	$\frac{(V_u - \phi V_c)s}{\phi f_y d}$
Separación de los estribos, $s$	Requerida	----	$\frac{A_v f_y}{0,75\sqrt{f'_c} b_w} \leq \frac{A_v f_y}{50b_w}$	$\frac{\phi A_v f_y d}{V_u - \phi V_c}$
	Máxima	----	$d / 2 \leq 24 \text{ in.}$	$d / 2 \leq 24 \text{ in. para}$ $(V_u - \phi V_c) \leq \phi 4\sqrt{f'_c} b_w d$ $d / 4 \leq 12 \text{ in. para}$ $(V_u - \phi V_c) > \phi 4\sqrt{f'_c} b_w d$

En la Figura 12-8 se ilustran los requisitos de resistencia al corte.



**Figura 12-8 – Requisitos de resistencia al corte**

A la expresión para la resistencia al corte proporcionada por la armadura  $\phi V_s$  se le puede asignar un valor de esfuerzo de corte específico para un tamaño de estribo y resistencia de la armadura determinados. La selección de la separación de los estribos se simplifica si la separación se expresa en función de la profundidad efectiva  $d$ , y no como valores numéricos. En general los límites prácticos para la separación de los estribos varían entre  $s = d/2$  y  $s = d/4$ , ya que las separaciones menores que  $d/4$  no resultan económicas. Suponiendo una separación intermedia de  $s = d/3$ , se puede obtener un valor específico de  $\phi V_s$  para cada tamaño de estribo y separación:

Para estribos verticales:

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v f_y d}{s} \quad \text{Ec. (11-7)}$$

Reemplazando  $s$  por  $d/n$ , para  $n = 2, 3$  y  $4$

$$\phi V_s = \phi A_v f_y n$$

Por lo tanto, para estribos No. 3 en U con una separación  $s = d/2$ ,  $f_y = 60$  ksi y  $\phi = 0,75$ :

$$\phi V_s = 0,75(2 \times 0,11)60 \times 2 = 19,8 \text{ kips, digamos 19 kips}$$

Los valores de  $\phi V_s$  indicados en la Tabla 12-2 se pueden usar para seleccionar la armadura de corte. Observar que los valores de  $\phi V_s$  son independientes de las dimensiones del elemento y de la resistencia del hormigón. La selección y la separación de los estribos usando los valores de diseño para  $\phi V_s = (V_u - \phi V_c)$  se puede resolver fácilmente mediante cálculos numéricos o en forma gráfica. Ver el Ejemplo 12.1.

Tabla 12-2 – Resistencia al corte  $\phi V_s$  en función del tamaño de barra y la separación

Separación	Resistencia al corte, $\phi V_s$ (kips)					
	Estribos en U No. 3*		Estribos en U No. 4*		Estribos en U No. 5*	
	Grado 40	Grado 60	Grado 40	Grado 60	Grado 40	Grado 60
d/2	13	19	24	36	37	55
d/3	19	29	36	54	55	83
d/4	26	39	48	72	74	111

\* Estribos de dos ramas (duplicar los valores para 4 ramas, etc.)

## CAPÍTULO 17 – ELEMENTOS DE HORMIGÓN CONSTRUIDOS EN ETAPAS (ELEMENTOS COMPUESTOS) SOLICITADOS A FLEXIÓN

### 17.4 RESISTENCIA AL CORTE VERTICAL

El artículo 17.4.1 del Código permite usar la totalidad del elemento compuesto solicitado a flexión para resistir el corte vertical como si se tratara de un elemento hormigonado de forma monolítica. Por lo tanto, se aplican los requisitos del Capítulo 11 del Código.

El artículo 17.4.3 permite utilizar la armadura de corte vertical como estribos para la armadura de corte horizontal, siempre que la armadura de corte vertical se prolongue y se ancle de acuerdo con los requisitos aplicables.

### 17.5 RESISTENCIA AL CORTE HORIZONTAL

En los elementos compuestos o contruidos en etapas solicitados a flexión, los esfuerzos de corte horizontales son provocados por el gradiente de momentos resultante del esfuerzo de corte vertical. Estos esfuerzos de corte horizontales actúan sobre la interfase de los elementos vinculados que forman el elemento compuesto.

El artículo 17.5.1 requiere la transmisión completa de los esfuerzos de corte horizontales por medio de fricción en las superficies de contacto, por medio de estribos anclados adecuadamente o por medio de una combinación de ambos métodos. A menos que se calcule de acuerdo con 17.5.3, el esfuerzo de corte horizontal aplicado mayorado  $V_u \leq \phi V_{nh}$ , siendo  $\phi V_{nh}$  la resistencia al corte horizontal (17.5.2).

La resistencia al corte horizontal es  $\phi V_{nh} = 0,80b_v d$  para el caso de superficies de contacto que se hayan hecho intencionalmente rugosas cuando no se usan estribos (sólo fricción), y para el caso de superficies que no se hayan hecho intencionalmente rugosas cuando se colocan los estribos mínimos de acuerdo con el artículo 17.6 (17.5.2.1 y 17.5.2.2). Cuando se colocan estribos de acuerdo con el artículo 17.6 y la superficie de contacto se hace intencionalmente rugosa hasta una amplitud total de aproximadamente 1/4 in., la resistencia al corte horizontal es:

$$\phi V_{nh} = (260 + 0,6\rho_v f_y) \lambda b_v d \leq 500b_v d \quad 17.5.2.3$$

La expresión para  $V_{nh}$  dada en el artículo 17.5.2.3 toma en cuenta el efecto de la cantidad de armadura que atraviesa la interfase incluyendo  $\rho_v$ , que es la relación entre el área de estribos y el área de la superficie de contacto, o bien  $\rho_v = A_v/b_v s$ . Además, incorpora el factor de corrección  $\lambda$  para incluir el hormigón liviano de acuerdo con lo establecido en el artículo 11.7.4.3. También se debe observar que para un hormigón con una resistencia a la compresión  $f'_c \leq 4444$  psi, el área mínima de estribos de acuerdo con la Ecuación (11-3) es  $\rho_v f_y = 50$  psi; reemplazando este valor en la ecuación anterior,  $V_{nh} = 290\lambda b_v d$ . El límite superior de  $500b_v d$  corresponde a  $\rho_v f_y = 400$  psi para el caso de hormigón de peso normal (es decir,  $\lambda = 1$ ).

Al calcular la resistencia al corte horizontal de un elemento compuesto o contruido en etapas solicitado a flexión se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Cuando  $V_u > \phi(500b_v d)$  se debe utilizar el método de corte por fricción del artículo 11.7.4 (17.5.2.4). En la Parte 14 se dan más detalles sobre la aplicación del artículo 11.7.4.
2. No se hace distinción entre elementos apuntalados y elementos no apuntalados durante su construcción (17.2.4). Ensayos realizados indican que la resistencia de un elemento compuesto o construido en etapas es la misma, ya sea que el primer elemento hormigonado se mantenga apuntalado o no durante la colocación del segundo.
3. Los elementos compuestos o construidos en etapas deben satisfacer los requisitos sobre control de las flechas según lo especificado en el artículo 9.5.6.
4. Las superficies de contacto deben estar limpias y libres de lechada de cemento. Las superficies se pueden hacer intencionalmente rugosas estriando las superficies con un rastrillo de alambres rígidos. Rastrillar o ranurar intensamente las superficies puede ser suficiente para lograr la "amplitud total de aproximadamente 4 in."
5. La profundidad efectiva,  $d$ , se define como la distancia desde la fibra comprimida extrema hasta el baricentro de la armadura de tracción de la totalidad de la sección compuesta (17.5.2.5). Para los elementos pretensados, la profundidad efectiva será el mayor valor entre  $d$  ó 0,8 veces la profundidad de la totalidad de la sección compuesta. Esto hace que la definición de  $d$  para secciones compuestas sea consistente con el diseño al corte especificado en otras secciones del Código. Este artículo es importante para el diseño de los elementos pretensados, donde con frecuencia la profundidad efectiva varía a lo largo del elemento.

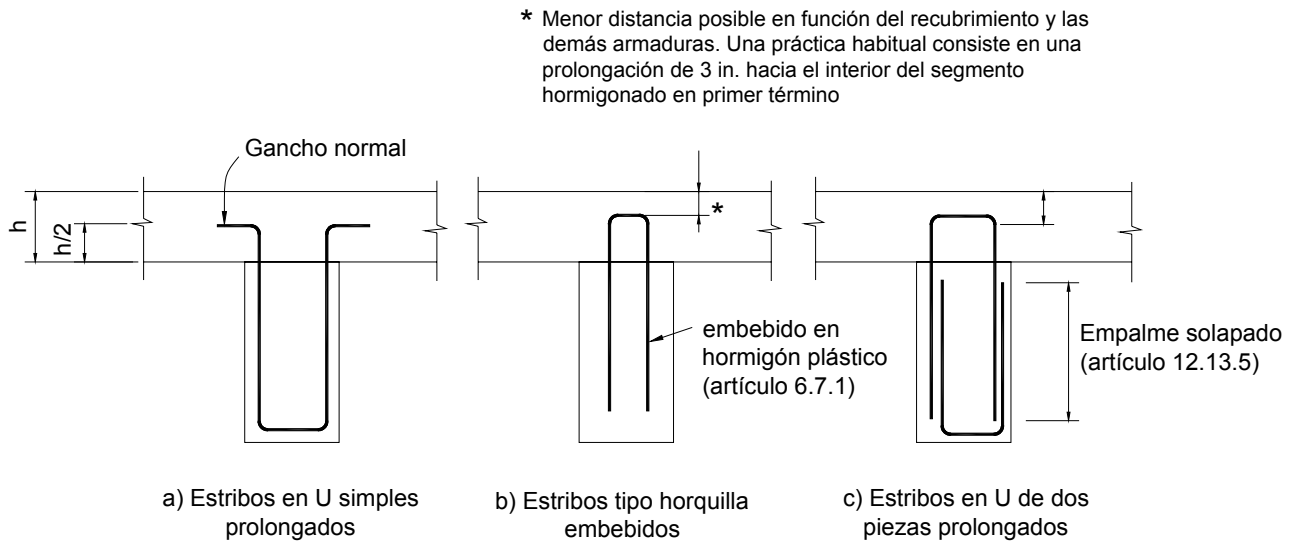
El Código también presenta un método alternativo para el diseño para corte horizontal en su artículo 17.5.3. El esfuerzo de corte horizontal que se debe transferir a través de la interfase entre las partes que componen un elemento compuesto o construido en etapas se toma como la variación del esfuerzo interno de compresión o tracción, paralelo a la interfase, de cualquier segmento del elemento. Cuando se utiliza este método se aplican los límites de los artículos 17.5.2.1 a 17.5.2.4, reemplazando el área de la superficie de contacto  $A_c$  por el valor  $b_v d$  en las ecuaciones. El artículo 17.5.3.1 también requiere que la armadura se distribuya de manera de reflejar aproximadamente la variación del esfuerzo de corte a lo largo del elemento. Este requisito enfatiza la diferencia entre el diseño de los elementos construidos en etapas sobre hormigón y sobre acero. El deslizamiento entre la viga de acero y la losa compuesta de hormigón en correspondencia con la máxima resistencia es grande, lo cual permite la redistribución del esfuerzo de corte a lo largo del elemento. En los elementos de hormigón con losa compuesta, el deslizamiento en correspondencia con la máxima resistencia es pequeño y la redistribución de la resistencia al corte a lo largo del elemento es limitada. Por lo tanto, en los elementos de hormigón construidos en etapas solicitados a flexión, la distribución de la armadura de corte horizontal se debe basar en la distribución del corte horizontal mayorado que actúa en el elemento.

## 17.6 ESTRIBOS PARA CORTE HORIZONTAL

Según el artículo 17.6.3, los estribos se deben anclar "en forma total" dentro de los elementos vinculados "de acuerdo con el artículo 12.3." La Figura 12-9 ilustra algunos detalles de estribos que se han usado exitosamente tanto en ensayos de laboratorio como en la práctica profesional. La Figura 12-9(a) muestra un estribo prolongado usado en los ensayos descritos en la Referencia 12.3. El uso de estribos embebidos tipo "horquilla," como el ilustrado en la Figura 12-9(b), constituye una práctica habitual en la industria del hormigón prefabricado pretensado. Muchos productos se fabrican de forma tal que resulta difícil ubicar los estribos para corte horizontal antes de colocar el hormigón. Por este motivo los estribos se embeben en el hormigón plástico como se permite en el artículo 16.7.1.

Para resistir el corte horizontal se puede usar armadura de corte (estribos) prolongada a partir del hormigón colocado previamente y anclada adecuadamente en la porción compuesta del elemento (Figura 12-9(c)) (17.4.3). Por lo tanto, esta armadura se puede usar para satisfacer los requisitos tanto de armadura de corte vertical como de armadura de corte horizontal.

El Ejemplo 12.6 ilustra el diseño para corte horizontal.



*Figura 12-9 – Estribos para corte horizontal*

## REFERENCIAS

- 12.1 Barney, G.B.; Corley, W.G.; Hanson J.M. y Parmelee, R.A., "Behavior and Design of Prestressed Concrete Beams with Large Web Openings," *PCI Journal*, V. 22, No. 6, Noviembre-Diciembre 1977, pp. 32-61. También, *Research and Development Bulletin* RD054D, Portland Cement Association, Skokie, IL.
- 12.2 Hanson N.W., *Precast-Prestressed Concrete Bridges 2, Horizontal Shear Connections*, Development Department Bulletin D35, Portland Cement Association, Skokie, IL.
- 12.3 Roller, J.J. y Russell, H.G., "Shear Strength of High Strength Concrete Beams with Web Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, Marzo-Abril 1990, pp. 191-198.

---

## Ejemplo 12.1 – Diseño al corte - Elementos solicitados exclusivamente a corte y flexión

---

Determinar el tamaño y la separación requerida de los estribos en U verticales para una viga simplemente apoyada de 30 ft de luz.

$$b_w = 13 \text{ in.}$$

$$d = 20 \text{ in.}$$

$$f'_c = 3000 \text{ psi}$$

$$f_y = 40.000 \text{ psi}$$

$$w_u = 4,5 \text{ kips/ft}$$

---

### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

---

Para los propósitos de este ejemplo se supondrá que la sobrecarga actúa en la totalidad del tramo, de manera que el corte de diseño en el centro de la luz es nulo. (Si se considera que la sobrecarga actúa sólo en una parte del tramo, en el centro de la luz se obtiene un corte de diseño mayor que cero.) Usando el procedimiento de diseño para la armadura de corte descrito en este capítulo:

1. Determinar los esfuerzos de corte mayorados

$$\text{En el apoyo: } V_u = 4,5(15) = 67,5 \text{ kips}$$

A una distancia  $d$  medida a partir del apoyo:

$$V_u = 67,5 - 4,5(20/12) = 60 \text{ kips} \quad 11.1.3.1$$

2. Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón

$$\phi V_c = \phi 2 \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{Ec. (11-3)}$$

$$\phi = 0,75 \quad 9.3.2.3$$

$$\phi V_c = 0,75(2) \sqrt{3000} \times 13 \times 20 / 1000 = 21,4 \text{ kips}$$

$$V_u = 60 \text{ kips} > \phi V_c = 21,4 \text{ kips}$$

Por lo tanto se requiere armadura de corte. 11.1.1

3. Calcular  $V_u - \phi V_c$  en la sección crítica.

$$V_u - \phi V_c = 60 - 21,4 = 38,6 \text{ kips} < \phi 8 \sqrt{f'_c} b_w d = 85,4 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA} \quad 11.5.6.9$$

4. Determinar la distancia  $x_c$  a partir del apoyo más allá de la cual se requiere armadura mínima de corte ( $V_u = \phi V_c$ ):

$$x_c = \frac{V_u \text{ en el apoyo} - \phi V_c}{w_u} = \frac{67,5 - 21,4}{4,5} = 10,2 \text{ ft}$$

Determinar la distancia  $x_m$  a partir del apoyo más allá de la cual el hormigón puede resistir la totalidad del esfuerzo de corte ( $V_u = \phi V_c / 2$ ):

$$x_m = \frac{V_u \text{ en el apoyo} - (\phi V_c / 2)}{w_u} = \frac{67,5 - (21,4 / 2)}{4,5} = 12,6 \text{ ft.}$$

5. Usar la Tabla 12-1 para determinar la separación requerida para los estribos en U verticales.

En la sección crítica:  $V_u = 60 \text{ kips} > \phi V_c = 21,4 \text{ kips}$

$$s (\text{requerida}) = \frac{\phi A_v f_y d}{V_u - \phi V_c} \quad \text{Ec. (11-15)}$$

Suponiendo estribos en U No. 4 ( $A_v = 0,40 \text{ in.}^2$ ),

$$s (\text{requerida}) = \frac{0,75 \times 0,40 \times 40 \times 20}{38,6} = 62 \text{ in.}$$

Verificar la máxima separación admisible de los estribos:

$$s (\text{max}) \leq d / 2 = 20 / 2 = 10 \text{ in.} \quad (\text{Valor determinante}) \quad 11.5.4.1$$

$$\leq 24 \text{ in. porque } V_u - \phi V_c = 38,6 \text{ kips} < \phi 4 \sqrt{f'_c} b_w d = 42,7 \text{ kips}$$

Máxima separación de los estribos en base a la armadura mínima de corte:

$$s (\text{max}) \leq \frac{A_v f_y}{0,75 \sqrt{f'_c} b_w} = \frac{0,4 \times 40.000}{0,75 \sqrt{3000} (13)} = 30 \text{ in.} \quad 11.5.5.3$$

$$\leq \frac{A_v f_y}{50 b_w} = \frac{0,4 \times 40.000}{50 \times 13} = 24,6 \text{ in.}$$

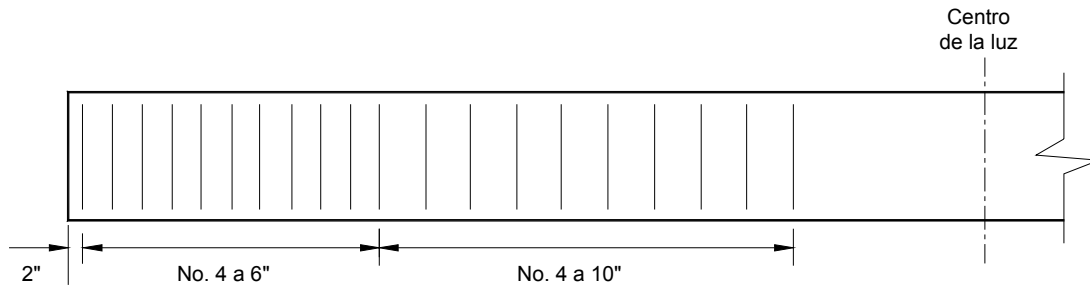
Determinar la distancia  $x$  a partir del apoyo más allá de la cual se puede usar una separación de 10 in. para los estribos:

$$10 = \frac{0,75 \times 0,4 \times 40.000 \times 20}{V_u - 21,4}$$

$$V_u - 21,4 = 24 \text{ kips} \text{ ó } V_u = 24 + 21,4 = 45,4 \text{ kips}$$

$$x = \frac{67,5 - 45,4}{4,5} = 4,9 \text{ ft}$$

Separación de los estribos usando estribos en U No. 4:



6. Como un procedimiento alternativo, usar el método simplificado presentado en la Tabla 12-2 para determinar el tamaño de los estribos y su separación.

En la sección crítica,

$$\phi V_s = V_u - \phi V_c = 60 - 21,4 = 38,6 \text{ kips}$$

De la Tabla 12-2 para estribos de acero Grado 40:

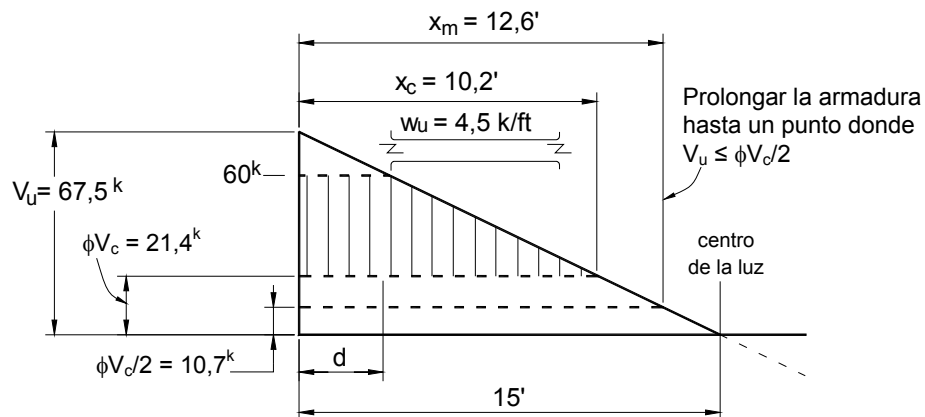
Para estribos en U No. 4 separados  $d/4$  se obtiene  $\phi V_s = 48 \text{ kips}$

Para estribos en U No. 4 separados  $d/3$  se obtiene  $\phi V_s = 36 \text{ kips}$

Interpolando, para estribos en U No. 4 separados  $d/3,22$  se obtiene 38,6 kips

Separación de los estribos =  $d/3,22 = 20/3,22 = 6,2 \text{ in.}$

La separación de los estribos a lo largo de la longitud de la viga se determina como se ilustró anteriormente.





## Ejemplo 12.2 – Diseño al corte - Elementos con tracción axial

Determinar la separación requerida de los estribos en U verticales para una viga con tracción axial.

$$f'_c = 3600 \text{ psi (hormigón de agregados liviano y arena, no se especifica } f_{ct})$$

$$f_y = 40.000 \text{ psi}$$

$$M_d = 43,5 \text{ ft-kips}$$

$$M_\ell = 32,0 \text{ ft-kips}$$

$$V_d = 12,8 \text{ kips}$$

$$V_\ell = 9,0 \text{ kips}$$

$$N_d = -2,0 \text{ kips (tracción)}$$

$$N_\ell = -15,2 \text{ kips (tracción)}$$

Cálculos y discusión	Referencia del Código
1. Determinar las cargas mayoradas.	9.2.1
$M_u = 1,2(43,5) + 1,6(32,0) = 103,4 \text{ ft-kips}$	Ec. (9-2)
$V_u = 1,2(12,8) + 1,6(9,0) = 29,8 \text{ kips}$	
$N_u = 1,2(-2,0) + 1,6(-15,2) = -26,7 \text{ kips (tracción)}$	
2. Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón.	
Como no se especifica la resistencia promedio a la tracción por compresión diametral $f_{ct}$ , $\sqrt{f'_c}$ se reduce aplicando un factor igual a 0,85 (hormigón de agregados livianos y arena)	11.2.1.2
$\phi V_c = \phi 2 \left[ 1 + \frac{N_u}{500 A_g} \right] 0,85 \sqrt{f'_c} b_w d$	Ec. (11-8)
$\phi = 0,75$	9.3.2.3
$\phi V_c = (0,75) 2 \left[ 1 + \frac{(-26.700)}{500(18 \times 10,5)} \right] 0,85 \sqrt{3600} (10,5) 16 / 1000 = 9,2 \text{ kips}$	
3. Verificar si la sección transversal es adecuada.	
$(V_u - \phi V_c) \leq \phi 8 (0,85) \sqrt{f'_c} b_w d$	11.5.6.9
Nota: 0,85 es un factor para hormigón liviano según lo especificado en 11.2.1.2.	
$(V_u - \phi V_c) = 29,8 - 9,2 = 20,6 \text{ kips}$	
$\phi 8 (0,85) \sqrt{f'_c} b_w d = 0,75 \times 8 \times 0,85 \sqrt{3600} \times 10,5 \times 16 / 1000 = 51,4 \text{ kips} > 20,6 \text{ kips}$	VERIFICA

4. Determinar la separación requerida para los estribos en U.

Suponiendo estribos en U No. 3 ( $A_v = 0,22 \text{ in.}^2$ )

$$s(\text{requerida}) = \frac{\phi A_v f_y d}{(V_u - \phi V_c)}$$

$$= \frac{0,75 \times 0,22 \times 40 \times 16}{20,6} = 5,1 \text{ in.}$$

5. Determinar la máxima separación admisible de los estribos.

$$V_u - \phi V_c = 20,6 \text{ kips}$$

$$\phi 4(0,85) \sqrt{f'_c} b_w d = 25,4 \text{ kips} > 20,6 \text{ kips}$$

11.2.1.2 y 11.5.4.3

Por lo tanto se aplican los requisitos del artículo 11.5.4.1.

$$s(\text{max}) \text{ de los estribos verticales} \leq d/2 = 8 \text{ in.} \quad (\text{valor determinante}) \quad 11.5.4.1$$

o bien  $\leq 24 \text{ in.}$

s (max) de los estribos en U No. 3 correspondiente a los requisitos de armadura mínima:

$$s(\text{max}) = \frac{A_v f_y}{0,75(0,85) \sqrt{f'_c} b_w} = \frac{0,22 \times 40.000}{0,75 \times 0,85 \times \sqrt{3600} \times 10,5} = 21,9 \text{ in.} \quad 11.5.5.3$$

$$s(\text{max}) = \frac{A_v f_y}{50 b_w} = \frac{0,22(40.000)}{50(10,5)} = 16,8 \text{ in.}$$

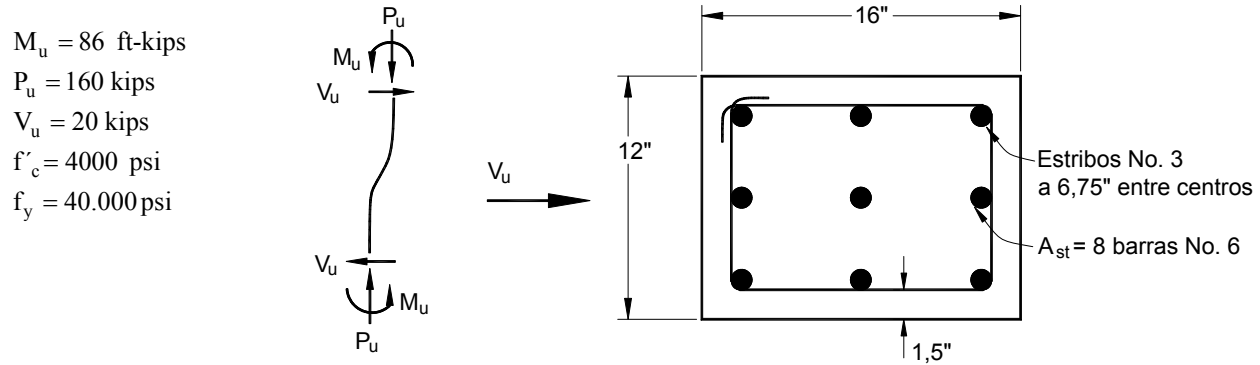
$$s(\text{max}) = 8 \text{ in.} \quad (\text{valor determinante})$$

En resumen:

Usar estribos verticales No. 3 con una separación de 5,0 in.

## Ejemplo 12.3 – Diseño al corte - Elementos con compresión axial

Un elemento comprimido con estribos se diseñó para las condiciones de carga indicadas. Sin embargo, en el diseño original no se consideró el hecho de que bajo una inversión de la dirección de la carga horizontal (viento), la carga axial, debido a los efectos combinados de las cargas gravitatorias y laterales, se transforma en  $P_u = 10$  kips, y no hay prácticamente ninguna variación de los valores de  $M_u$  y  $V_u$ . Verificar los requisitos de armadura de corte para la columna (1) para las cargas de diseño originales y (2) para carga axial reducida.



### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

Condición 1:  $P_u = N_u = 160$  kips

- Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón.

$$d = 16 - [1,5 + 0,375 + (0,750/2)] = 13,75 \text{ in.}$$

$$\phi V_c = \phi 2 \left[ 1 + \frac{N_u}{2000 A_g} \right] \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{Ec. (11-4)}$$

$$\phi = 0,75 \quad 9.3.2.3$$

$$\phi V_c = 0,75(2) \left[ 1 + \frac{160.000}{2000(16 \times 12)} \right] \sqrt{4000} (12)(13,75)/1000 = 22,2 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = 22,2 \text{ kips} > V_u = 20 \text{ kips}$$

- Debido a que  $V_u = 20 \text{ kips} > \phi V_c / 2 = 11,1 \text{ kips}$  es necesario satisfacer los requisitos de armadura mínima de corte. 11.5.5.1

Estribos No. 3 ( $A_v = 0,22 \text{ in.}^2$ )

$$s(\text{max}) = \frac{A_v f_y}{0,75 \sqrt{f'_c} b_w} = \frac{0,22(40.000)}{0,75 \sqrt{4000} (12)} = 15,5 \text{ in.} \quad \text{Ec. (11-13)}$$

$$s(\max) = \frac{A_v f_y}{50b_w} = \frac{0,22(40.000)}{50(12)} = 14,7 \text{ in.}$$

$$s(\max) = d/2 = 13,75/2 = 6,9 \text{ in.} \quad (\text{valor determinante})$$

Por lo tanto, usar  $s = 6,75 \text{ in.}$  es satisfactorio.

Condición 2:  $P_u = N_u = 10 \text{ kips}$

1. Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón.

$$\phi V_c = 0,75(2) \left[ 1 + \frac{(10.000)}{2000(16 \times 12)} \right] \times \sqrt{4000}(12)(13,75)/1000 = 16,1 \text{ kips} \quad \text{Ec. (11-4)}$$

$$\phi V_c = 16,1 \text{ kips} < V_u = 20 \text{ kips}$$

Se debe colocar armadura de corte para resistir el exceso de corte.

2. Determinar la máxima separación admisible de los estribos No. 3.

$$s(\max) = \frac{d}{2} = \frac{13,75}{2} = 6,9 \text{ in.} \quad 11.5.4.1$$

La máxima separación,  $d/2$ , es determinante para las Condiciones 1 y 2.

3. Verificar la resistencia total al corte con estribos No. 3 separados 6,75 in.

$$\phi V_s = \phi A_v f_y \frac{d}{s} = \frac{0,75(0,22)(40)(13,75)}{6,75} = 13,4 \text{ kips} \quad \text{Ec. (11-15)}$$

$$\phi V_c + \phi V_s = 16,1 + 13,4 = 29,5 \text{ kips} > V_u = 20 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA}$$

---

## Ejemplo 12.4 – Diseño al corte - Entrepiso nervurado de hormigón

---

Verificar los requisitos de corte en el entrepiso nervurado uniformemente cargado ilustrado a continuación

$$f'_c = 4000 \text{ psi}$$

$$f_y = 40.000 \text{ psi}$$

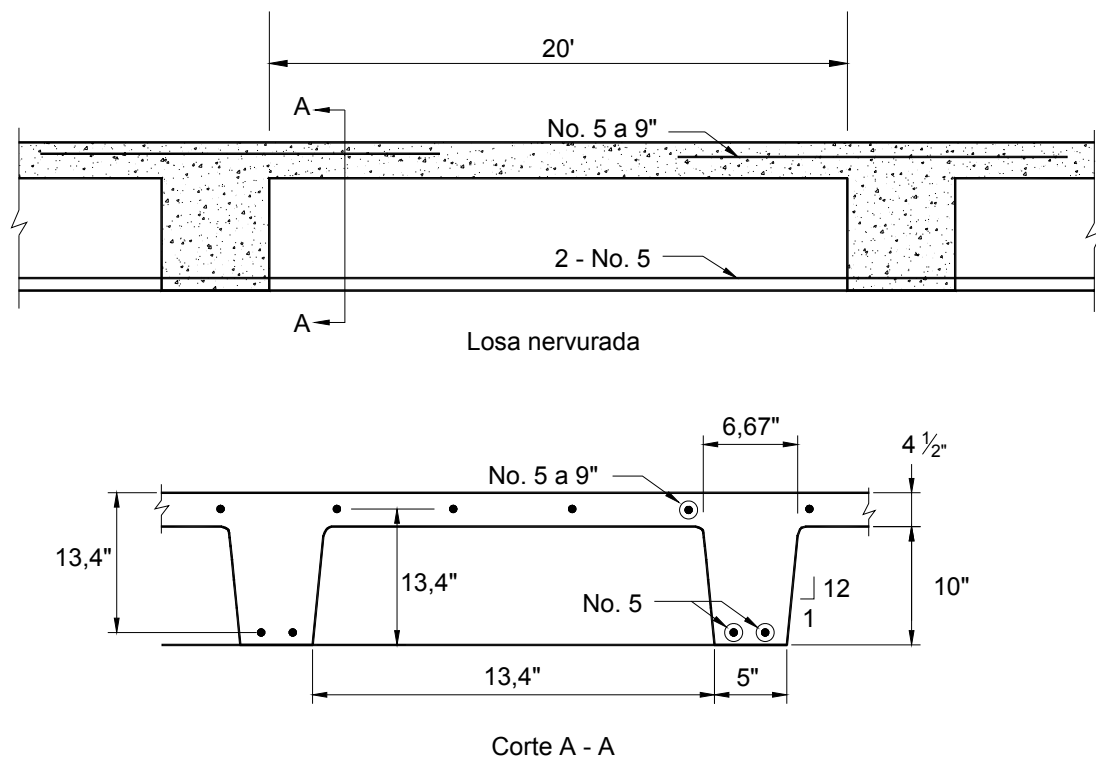
$$w_d = 77 \text{ lb/ft}^2$$

$$w_\ell = 120 \text{ lb/ft}^2$$

Armadura longitudinal supuesta:

Barras inferiores: 2 barras No. 5

Barras superiores: Barras No. 5 separadas 9 in.



---

### Cálculos y discusión

---

### Referencia del Código

1. Determinar la carga mayorada.

$$w_u = [1.2(77) + 1.6(120)]35/12 = 830 \text{ lb/ft}$$

Ec. (9-2)

2. Determinar el esfuerzo de corte mayorado.

A una distancia  $d$  del apoyo:

11.1.3.1

$$V_u = 0,83(10) - 0,83(13,4/12) = 7,4 \text{ kips} \quad 8.3.3$$

3. Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón.

De acuerdo con el artículo 8.11.8,  $V_c$  se puede aumentar en 10 por ciento.

Ancho promedio del alma de los nervios  $b_w = (6,67 + 5)/2 = 5,83 \text{ in.}$

$$\phi V_c = 1,1 \phi 2 \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{Ec. (11-3)}$$

$$\phi = 0,75 \quad 9.3.2.3$$

$$\phi V_c = 1,1(0,75)2\sqrt{4000}(5,83)(13,4)/1000 = 8,2 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = 8,2 \text{ kips} > V_u = 7,4 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA}$$

Observar que no se requiere armadura mínima de corte para las construcciones nervuradas definidas en el artículo 8.11. 11.5.5.1(b)

Alternativamente, calcular  $V_c$  usando la Ecuación (11-5).

Calcular  $\rho_w$  y  $V_u d / M_u$  a una distancia  $d$  del apoyo:

$$\rho_w = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{(2 \times 0,31)}{5(13,4)} = 0,0093$$

$$M_u \text{ en la cara del apoyo} = \frac{w_u \ell_n^2}{11} = \frac{0,83(20)^2}{11} = 30,2 \text{ ft-kips}$$

$$\begin{aligned} M_u \text{ a una distancia } d &= \frac{w_u \ell_n^2}{11} + \frac{w_u d^2}{2} - \frac{w_u \ell_n d}{2} \\ &= 30,2 + \frac{(0,83)(13,4/12)^2}{2} - \frac{(0,83)(20)(13,4/12)}{2} = 21,5 \text{ ft-kips} \end{aligned}$$

$$\frac{V_u d}{M_u} = \frac{7,4(13,4/12)}{21,5} = 0,38 < 1,0 \quad \text{VERIFICA} \quad 11.3.2.1$$

$$\begin{aligned} \phi V_c &= \phi 1,1 \left( 1,9 \sqrt{f'_c} + 2500 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \leq \phi (1,1) 3,5 \sqrt{f'_c} b_w d \\ &= 0,75(1,1) \left[ 1,9 \sqrt{4000} + 2500(0,0093)(0,38) \right] (5,83)(13,4)/1000 \end{aligned}$$

$$= 8,3 \text{ kips} < 0,75(1,1)(3,5) \sqrt{4000}(5,83)(13,4)/1000 = 14,3 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA}$$

$$\phi V_c = 8,3 \text{ kips} > V_u = 7,4 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA}$$

---

## Ejemplo 12.5 – Diseño al corte - Resistencia al corte en las aberturas en el alma de un elemento

---

La viga tipo Te doble simplemente apoyada pretensada que se ilustra a continuación se ha diseñado, sin aberturas en el alma, para soportar una sobrecarga de  $50 \text{ lb/ft}^2$  ( $w_u = 1520 \text{ lb/ft}$ ). En el alma se requieren dos aberturas de 10 in. de profundidad por 36 in. de longitud para colocar tuberías de servicios mecánicos y eléctricos. Investigar la resistencia al corte de la viga en la abertura A.

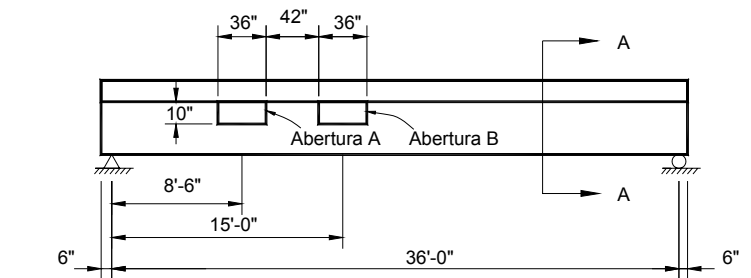
Este ejemplo de diseño se basa en un estudio experimental y analítico informado en la Referencia 12.1.

Viga:  $f'_c = 6000 \text{ psi}$

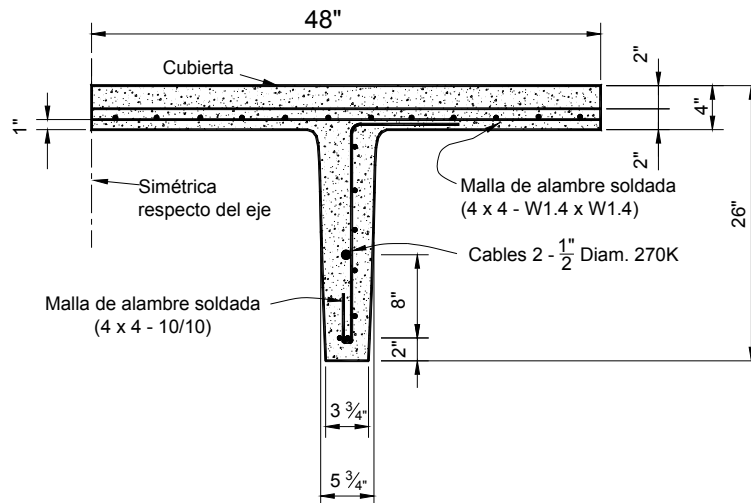
Cubierta sobre la viga:  $f'_c = 3000 \text{ psi}$

$f_{pu} = 270.000 \text{ psi}$

$f_y = 60.000 \text{ psi}$



Elevación



Corte A-A  
(mitad de la sección tipo Te doble)

---

### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

Este ejemplo sólo abarca las consideraciones sobre la resistencia al corte para la abertura en el alma. También es necesario investigar otras consideraciones de resistencia, tales como: para evitar el deslizamiento del cable de pretensado, las aberturas se deben ubicar fuera de la longitud de desarrollo requerida para el cable, y se debe verificar la resistencia de las bielas comprimidas para resistir la flexión y las cargas axiales. El lector encontrará un ejemplo de diseño completo en la Referencia 12.1. El ejemplo de diseño de la Referencia 12.1 también ilustra procedimientos para verificar las tensiones y flechas alrededor de las aberturas a nivel de carga de servicio.

1. Determinar el momento y el corte mayorados en el centro de la abertura A. Debido a que la viga es simétrica respecto del eje, considerar sólo la mitad de la sección tipo Te doble.

$$w_u = \frac{1520}{2} = 760 \text{ lb/ft por cada Te}$$

$$M_u = 0,760(36/2)(8,5) - (0,760)(8,5)^2 / 2 = 88,8 \text{ ft-kips}$$

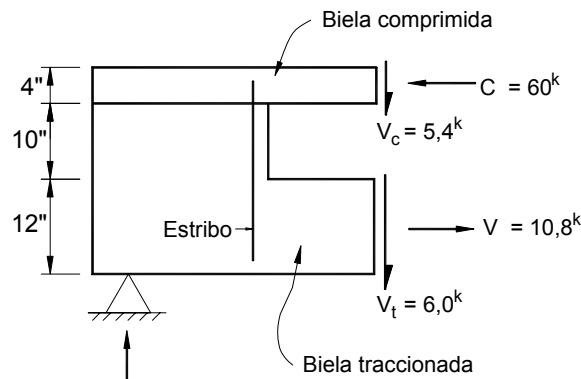
$$V_u = 0,760(36/2) - 0,760(8,5) = 7,2 \text{ kips}$$

2. Determinar la armadura de corte requerida adyacente a la abertura. Se deben proveer estribos verticales adyacentes a ambos lados de la abertura. Los estribos se deben dimensionar para resistir la fuerza de corte total en la abertura.

$$A_v = \frac{V_u}{\phi f_y} = \frac{7200}{0,75 \times 60.000} = 0,16 \text{ in.}^2$$

Usar estribos en U No. 3, uno a cada lado de la abertura ( $A_v = 0,22 \text{ in.}^2$ )

3. Usando el procedimiento analítico simplificado desarrollado en la Referencia 12.1, se calculan las fuerzas axiales y de corte que actúan en las "bielas" por encima y por debajo de la abertura A. Los resultados obtenidos se indican en la figura siguiente. En el ejemplo de diseño completo de la Referencia 12.3 el lector encontrará el desarrollo del cálculo de las fuerzas. En el diseño al corte de las bielas se deben tomar en cuenta los esfuerzos axiales.



4. Investigar la resistencia al corte para la biela traccionada.

$$V_u = 6,0 \text{ kips}$$

$$N_u = -10,8 \text{ kips} \quad 11.0$$

$$d = 0,8h = 0,8(12) = 9,6 \text{ in.} \quad 11.0$$

$$b_w = \text{ancho promedio de la biela traccionada} = [3,75 + (3,75 + 2 \times 12 / 22)] / 2 = 4,3 \text{ in.}$$

$$V_c = 2 \left( 1 + \frac{N_u}{500A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad \text{Ec. (11-8)}$$



$$= 2 \left( 1 - \frac{10.800}{500 \times 4,3 \times 12} \right) \sqrt{6000} (4,3)(9,6)/1000 = 3,72 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = 0,75(3,72) = 2,8 \text{ kips}$$

$$V_u = 6,0 \text{ kips} > \phi V_c = 2,8 \text{ kips}$$

Por lo tanto, en la biela traccionada se requiere armadura de corte.

$$A_v = \frac{(V_u - \phi V_c)s}{\phi f_y d}$$

$$= \frac{(6,0 - 2,8)9}{0,75 \times 60 \times 9,6} = 0,07 \text{ in.}^2$$

$$\text{siendo } s = 0,75h = 0,75 \times 12 = 9 \text{ in.}$$

11.5.4.1

Usar estribos No. 3 de una sola rama separados 9 in. entre centros en la biela traccionada ( $A_v = 0,11 \text{ in.}^2$ ). Anclar los estribos alrededor de los cables de pretensado con un gancho a 180 grados en cada extremo.

5. Investigar la resistencia al corte para la biela comprimida.

$$V_u = 5,4 \text{ kips}$$

$$N_u = 60 \text{ kips}$$

11.0

$$d = 0,8h = 0,8(4) = 3,2 \text{ in.}$$

$$b_w = 48 \text{ in.}$$

$$V_c = 2 \left( 1 + \frac{N_u}{2000 A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d$$

$$= 2 \left( 1 + \frac{60.000}{2000 \times 48 \times 4} \right) \sqrt{3000} (48)(3,2)/1000 = 19,5 \text{ kips}$$

Ec. (11-4)

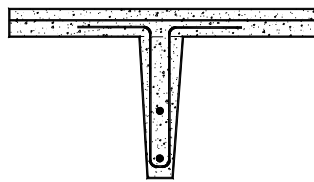
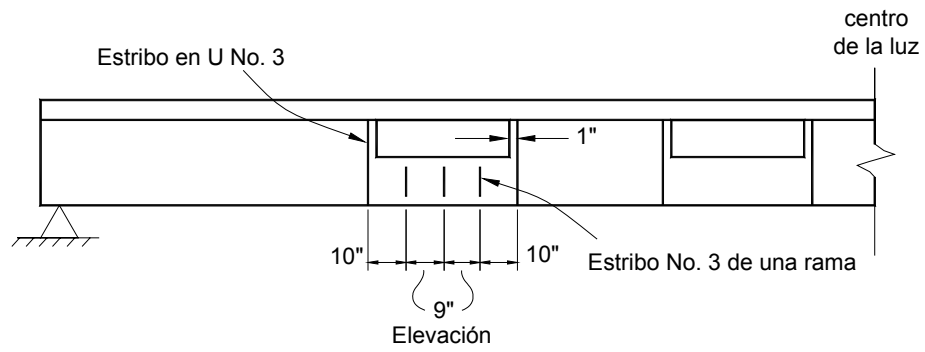
$$\phi V_c = 0,75(19,5) = 14,6 \text{ kips}$$

$$V_u = 5,4 \text{ kips} < \phi V_c = 14,6 \text{ kips}$$

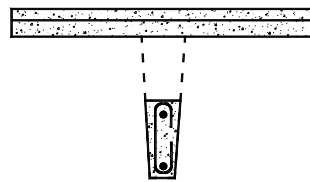
Por lo tanto, en la biela comprimida no se requiere armadura de corte.

6. Resumen del diseño - Ver los detalles de armado a continuación.

- Usar un estribo en U No. 3 adyacente a ambos lados de la abertura para contener la fisuración dentro de las bielas.
- Usar estribos No. 3 de una rama separados 9 in. entre centros como armadura adicional en la biela traccionada.



Estrizo en U



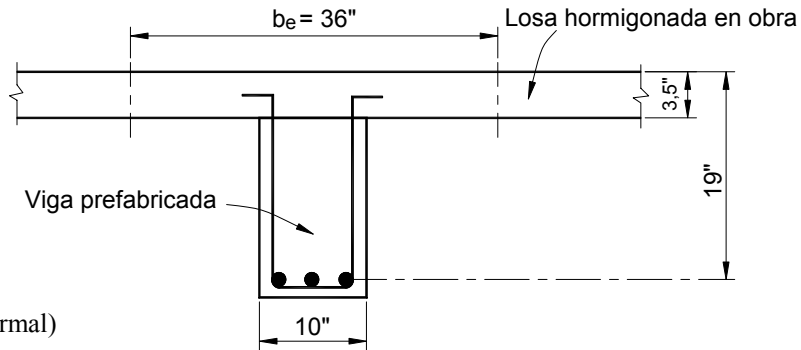
Estrizo de una rama

Detalles de la armadura adicional

Para la abertura B se requiere un procedimiento de diseño similar.

## Ejemplo 12.6 – Diseño para corte horizontal

Para la construcción compuesta formada por una losa y una viga prefabricada ilustrada, diseñar para la transferencia de corte horizontal en la superficie de contacto entre la viga y la losa para los tres casos indicados. Asumir que la viga es simplemente apoyada y tiene una longitud de 30 ft.



$f'_c = 3000$  psi (hormigón de peso normal)  
 $f_y = 60.000$  psi

### Cálculos y discusión

### Referencia del Código

Caso I: Carga permanente de servicio = 315 lb/ft  
 Sobrecarga de servicio = 235 lb/ft

- Determinar el esfuerzo de corte mayorado  $V_u$  en el extremo del tramo.

$$V_u = 1,2D + 1,6L \quad \text{Ec. (9-2)}$$

$$= 1,2(0,315)(30/2) + 1,6(0,235)(30/2) = 11,3 \text{ kips}$$

A una distancia  $d$  medida a partir de la cara del apoyo: 11.1.3.1

$$V_u = 11,3 - \frac{19}{12} [1,2(0,315) + 1,6(0,235)] = 10,1 \text{ kips}$$

- Determinar la resistencia al corte horizontal. 17.5.2

$$V_u \leq \phi V_{nh} \quad \text{Ec. (17-1)}$$

$$\phi V_{nh} = \phi(80b_v d) \quad \text{17.5.2.1 y 17.5.2.2}$$

$$= 0,75(80 \times 10 \times 19) / 1000 = 11,4 \text{ kips}$$

$$V_u = 10,1 \text{ kips} \leq \phi V_{nh} = 11,4 \text{ kips}$$

Por lo tanto, diseñar de acuerdo con los artículos 17.5.2.1 ó 17.5.2.2:

Nota: Para cualquiera de las dos condiciones, antes de colocar la losa de hormigón la superficie de la viga prefabricada debe estar limpia y libre de lechada de cemento.

Si la superficie superior de la viga prefabricada se ha hecho intencionalmente rugosa no se requieren estribos. 17.5.2.1

Si la superficie superior de la viga prefabricada no se ha hecho intencionalmente rugosa se requieren estribos mínimos de acuerdo con el artículo 17.6. 17.5.2.2

3. Determinar el área mínima de estribos requerida.

$$A_v = \frac{0,75\sqrt{f'_c} b_w d}{f_y} \geq \frac{50b_w s}{f_y} \quad 17.6.1, 11.5.5.3$$

donde  $s \text{ (max)} = 4(3,5) = 14 \text{ in.} < 24 \text{ in.}$  17.6.1

$$A_v = \frac{0,75\sqrt{3000}(10)(14)}{60.000} = 0,096 \text{ in.}^2 \text{ a } 14 \text{ in. entre centros}$$

$$\text{Min. } A_v = \frac{50 \times 10 \times 14}{60.000} = 0,117 \text{ in.}^2 \text{ a } 14 \text{ in. entre centros}$$

$$\text{o bien } 0,10 \text{ in.}^2/\text{ft}$$

Caso II: Carga permanente de servicio = 315 lb/ft  
Sobrecarga de servicio = 1000 lb/ft

1. Determinar el esfuerzo de corte mayorado  $V_u$  en el extremo del tramo.

$$V_u = 1,2(0,315)(15) + 1,6(1,0)(15) = 29,7 \text{ kips}$$

A una distancia  $d$  medida a partir de la cara del apoyo: 11.1.3.1

$$V_u = 29,7 - \frac{19}{12} [1,2(0,315) + 1,6(1,0)] = 26,6 \text{ kips}$$

2. Determinar la resistencia al corte horizontal. 17.5.2

$$V_u = 26,6 \text{ kips} > \phi V_{nh} = \phi(80b_v d) = 11,4 \text{ kips}$$

Por lo tanto se debe satisfacer el artículo 17.5.2.3. Se requieren estribos mínimos como se calculó anteriormente ( $A_v = 0,10 \text{ in.}^2$ ).

$$V_{nh} = \phi(260 + 0,6\rho_v f_y) \lambda b_v d \quad 17.5.2.3$$

$$\text{donde } \rho_v = \frac{A_v}{b_v s} = \frac{0,10 \text{ in.}^2}{10 \text{ in.}(12 \text{ in.})}$$

$$= 0,00083$$

$$\lambda = 1,0 \quad (\text{hormigón de peso normal}) \quad 11.7.4.3$$

$$\phi V_{nh} = 0,75(260 + 0,6(0,00083)60.000)(1,0 \times 10 \times 19) = 0,75(290)190 = 41,3 \text{ kips}$$

$$\phi V_{nh} = 41,3 \text{ kips} < \phi(500b_v d)/1000 = 71,3 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA} \quad 17.5.2.3$$

$$V_u = 26,6 \text{ kips} < \phi V_{nh} = 41,3 \text{ kips}$$

Por lo tanto, diseñar de acuerdo con el artículo 17.5.2.3:

La superficie de contacto se debe hacer rugosa hasta "una amplitud total de aproximadamente 1/4 in.," y se deben proveer estribos mínimos de acuerdo con el artículo 17.6.

3. Comparar los estribos requeridos con la armadura de corte vertical requerida en el extremo del tramo.

$$V_u = 26,6 \text{ kips}$$

$$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d = 2\sqrt{3000} \times 10 \times 19 / 1000 = 20,8 \text{ kips} \quad \text{Ec. (11-3)}$$

$$V_u \leq \phi(V_c + V_s) = \phi V_c + \phi A_v f_y \frac{d}{s} \quad \text{Ec. (11-15)}$$

Resolviendo para  $A_v / s$ :

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_u - \phi V_c}{\phi f_y d} = \frac{26,6 - (0,75) \times (20,8)}{0,75 \times 60 \times 19} = 0,013 \text{ in.}^2 / \text{in.}$$

$$s_{\max} = \frac{19}{2} = 9,5 \text{ in.} < 24 \text{ in.} \quad 11.5.4.1$$

$$A_v = 0,013 \times 9,5 = 0,12 \text{ in.}^2$$

Colocar estribos en U No. 3 separados 9,5 in, entre centros ( $A_v = 0,28 \text{ in.}^2/\text{ft}$ ). Este valor es mayor que los estribos mínimos requeridos para corte horizontal ( $A_v = 0,10 \text{ in.}^2$ ) de manera que los estribos en U No. 3 separados 9,5 in, entre centros satisfacen los requisitos de armadura tanto de corte vertical como de corte horizontal. Los estribos se deben anclar adecuadamente en la losa mediante una longitud embebida o mediante ganchos. Ver Figura 12-9.

Caso III: Carga permanente de servicio = 315 lb/ft  
Sobrecarga de servicio = 3370 lb/ft

1. Determinar el esfuerzo de corte mayorado  $V_u$  en el extremo del tramo.

$$V_u = 1,2(0,315)(15) + 1,6(3,37)(15) = 86,6 \text{ kips}$$

A una distancia  $d$  del apoyo

$$V_u = 86,6 - \frac{19}{12} [1,2(0,315) + 1,6(3,37)] = 77,5 \text{ kips}$$

$$V_u = 77,5 \text{ kips} > \phi(500b_v d) = 0,75(500 \times 10 \times 19) / 1000 = 71,3 \text{ kips} \quad 17.5.2.4$$

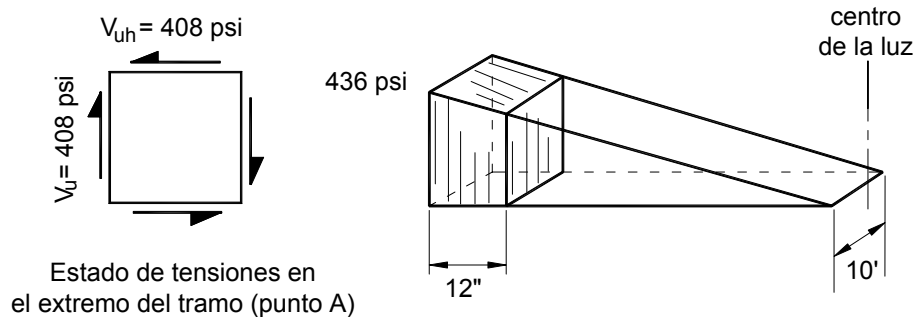
Como  $V_u$  es mayor que  $\phi(500b_vd)$ , el diseño para corte horizontal se debe realizar de acuerdo con el artículo 11.7.4 - Corte por fricción. El corte a lo largo de la superficie de contacto entre la viga y la losa es resistido por armadura de corte por fricción que atraviesa la superficie de contacto y es perpendicular a la misma.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 17.5.3.1, la separación entre los estribos debe ser variable y estar basada en la distribución real del corte horizontal. El siguiente método parece razonable y se ha utilizado en el pasado:

Convirtiendo el esfuerzo de corte mayorado en una tensión unitaria, la tensión de corte horizontal mayorada a una distancia  $d$  del extremo del tramo es:

$$v_{uh} = \frac{V_u}{b_v d} = \frac{77,5}{10 \times 19} = 0,408 \text{ ksi}$$

El "bloque de tensiones" se puede representar de la siguiente manera:



Asumir que el corte horizontal es uniforme por pie de longitud, de manera que la fuerza de transferencia de corte para el primer pie de longitud es:

$$V_{uh} = 0,408 \times 10 \times 12 = 49,0 \text{ kips}$$

El área requerida de armadura de corte por fricción se calcula usando las Ecuaciones (11-1) y (11-25):

$$V_{uh} \leq \phi V_n = \phi A_{vf} f_y \mu \quad \text{Ec. (11-25)}$$

$$A_{vf} = \frac{V_{uh}}{\phi f_y \mu}$$

Si a la superficie superior de la viga prefabricada se le imprime intencionalmente una rugosidad hasta aproximadamente  $1/4 \text{ in.}$ ,  $\mu = 1,0$ . 11.7.4.3

$$A_{vf} = \frac{49,0}{0,75 \times 60 \times 1,0} = 1,09 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

Con estribos No. 5 de dos ramas,  $A_{vf} = 0,62 \text{ in.}^2$

$$s = \frac{0,62 \times 12}{1,09} = 6,8 \text{ in.}$$

Usar estribos en U No. 5 separados 6,5 in. entre centros para una distancia mínima igual a (d + 12 in.) a partir del extremo del tramo.

Si a la superficie superior de la viga prefabricada no se le imprime intencionalmente una rugosidad,  $\mu = 0,6$ .

11.7.4.3

$$A_{vf} = \frac{49,0}{0,75 \times 60 \times 0,6} = 1,81 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

$$s = \frac{0,62 \times 12}{1,81} = 4,1 \text{ in.}$$

Usar estribos en U No. 5 separados 4 in. entre centros para una distancia mínima igual a (d + 12 in.) a partir del extremo del tramo.

Este método se puede usar para determinar la separación de los estribos en cada longitud sucesiva de un pie. El esfuerzo de corte variará en cada incremento de un pie y la separación de los estribos puede variar de manera acorde hasta llegar a un máximo de 14 in. hacia el centro del tramo.

Nota: Los detalles finales de los estribos son determinados por los requisitos de corte vertical.