

Hormigón Pretensado – Corte

ACTUALIZACIÓN PARA EL CÓDIGO 2002

En el Código 2002 no se modificaron los requisitos referidos al corte en los elementos de hormigón pretensado. Sólo se introdujo un cambio editorial de poca importancia a fin de lograr consistencia en el uso de la terminología "acero de pretensado" y "tendón" o "cable."

Obviamente el diseño al corte se vio afectado por la revisión de los factores de carga y factores ϕ del Capítulo 9.

CONSIDERACIONES GENERALES

Las expresiones básicas para el diseño al corte de los elementos de hormigón pretensado, Ecuaciones (11-10), (11-11) y (11-12), fueron introducidas en la edición del Código de 1963. Aunque están bien fundamentadas en resultados de ensayos, su aplicación práctica no ha resultado sencilla. En el Código de 1971 se introdujo una ecuación simplificada, la Ecuación (11-9).

Para comprender las Ecuaciones (11-10) y (11-12) es aconsejable repasar los principios en los cuales se basa el diseño al corte del Código ACI. Estos principios son empíricos, desarrollados en base a una gran cantidad de ensayos.

- El esfuerzo de corte resistido por el hormigón y el esfuerzo de corte resistido por los estribos son aditivos.
- El esfuerzo de corte resistido por el hormigón después de la formación de fisuras de corte es como mínimo igual al corte existente en el hormigón en la ubicación de la fisura de corte en el momento en que se forma la fisura de corte.

Pero cómo se calcula el esfuerzo de corte resistido por el hormigón en el momento en que se forma una fisura de corte? Existen dos posibilidades.

1. Fisuración por corte en el alma. Se origina una fisura de corte diagonal en el alma, próxima al eje neutro, provocada por la tensión principal de tracción en el alma.
2. Fisuración de corte por flexión. Una fisura comienza como una fisura por flexión en la cara traccionada de un elemento solicitado a flexión. Luego esta fisura se extiende hacia el alma, y se desarrolla en una fisura de corte diagonal. Esto puede ocurrir para una tensión principal de tracción mucho menor que la que provoca una fisura de corte en el alma, ya que en la punta de la fisura hay concentración de las tensiones de tracción.

Corte en el alma

La resistencia a tracción aparente del hormigón en tracción directa es aproximadamente $4\sqrt{f'_c}$. Cuando la tensión principal de tracción en el centro de gravedad de la sección transversal llega a $4\sqrt{f'_c}$ se producirá una fisura de corte en el alma. El artículo 11.4.2.2 establece que "... V_{cw} se debe calcular como el esfuerzo de corte ... que produce una tensión principal de tracción de $4\sqrt{f'_c}$..."

La compresión debida al pretensado ayuda a reducir la tensión principal de tracción. Pero calcular la tensión principal de tracción debida a la combinación de corte y compresión puede resultar tedioso, y por esta causa el código contiene un procedimiento simplificado.

$$V_{cw} = (3,5\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc})b_w d + V_p \quad \text{Ec. (11-12)}$$

En la Ecuación (11-12) el término V_p es la componente vertical de la tracción en los cables de pretensado. Esta es aditiva para la resistencia al corte en el alma (pero no para la resistencia al corte por flexión).

A continuación presentamos una comparación con respecto a valores obtenidos mediante ensayos.

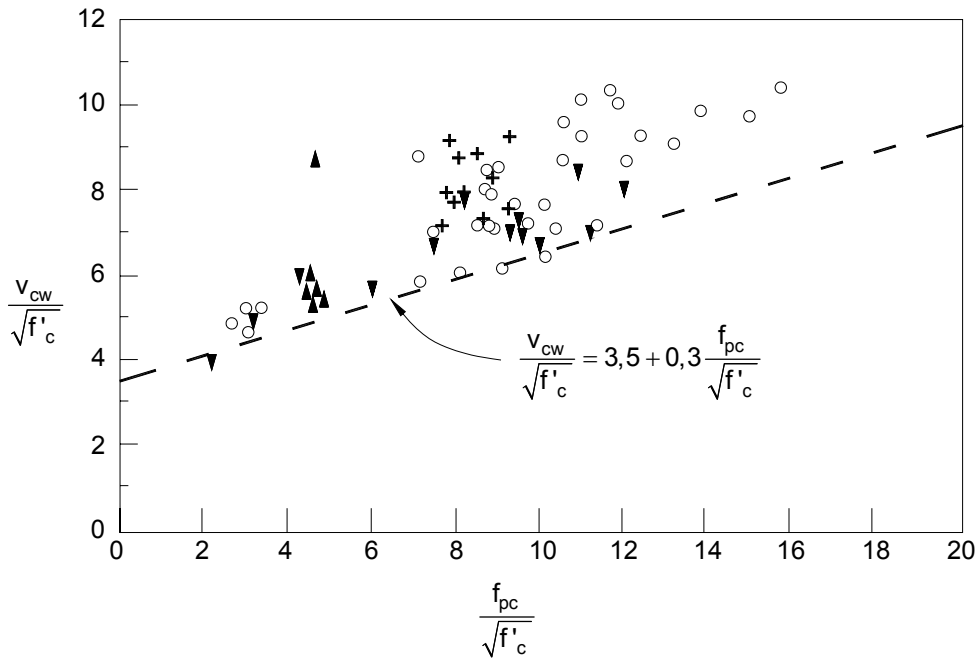


Figura 25-1 – Fisuración diagonal en regiones anteriormente no fisuradas

La compresión debida al pretensado aumenta la resistencia al corte un 30 por ciento del nivel correspondiente a P/A , f_{pc} , de compresión.

En una viga no pretensada la tensión principal de tracción en el centro de gravedad de la sección es igual al corte. Porque entonces la Ecuación (11-3) para corte en elementos no pretensados permite que el hormigón resista sólo un corte de $2\sqrt{f'_c}$? Porque la fisuración por flexión reduce la resistencia al corte. En las vigas no pretensadas el corte casi siempre es afectado por la tracción por flexión. Pero en el caso de los elementos pretensados, el pretensado reduce la fisuración por flexión.

Corte por flexión en los elementos de hormigón pretensado

En las vigas pretensadas la tensión de pretensado retrasa la fisuración por flexión – generalmente hasta que la carga es mayor que la carga de servicio. Por lo tanto vale la pena tomar en cuenta los efectos favorables del pretensado.

En la década del 50 se creía que colocando cables de perfil curvo aumentaría la resistencia al corte, gracias a la componente vertical V_p de la fuerza de pretensado. Pero los ensayos que se realizaron demostraron que ocurría exactamente lo contrario. Porque? Porque los cables de perfil curvo reducen la resistencia a la fisuración por flexión en el tramo de corte.

Los ensayos se realizaron aplicando cargas concentradas, mientras que la carga permanente de las vigas era una carga uniforme. Por este motivo, cuando se desarrolló el método de diseño al corte a partir de los resultados de estos ensayos, los cortes correspondientes a las cargas permanentes y a las cargas de ensayo se trataron por separado.

Corte por flexión

La Ecuación (11-10) es la expresión para determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, determinada por las fisuras por flexión que se desarrollan y se transforman en fisuras de corte. La resistencia al corte del hormigón en una sección transversal dada se toma igual al corte en la sección en el momento en que ocurre una fisura por flexión, más un pequeño incremento de corte necesario para transformar la fisura por flexión en una fisura diagonal. La Ecuación (11-11) se puede explicar de la siguiente manera.

V_{ci} = corte existente en el momento que se produce la fisura por flexión, más un incremento necesario para convertir esa fisura en una fisura de corte. Este incremento es igual a $0,6 b_w d \sqrt{f'_c}$.

El esfuerzo de corte que existe en el momento que se produce la fisura por flexión es el esfuerzo de corte debido a la carga permanente V_d más el esfuerzo de corte $V_i M_{cr} / M_{max}$.

Cuál es el origen del término $V_i M_{cr} / M_{max}$?

El término V_i es el esfuerzo de corte último mayorado en la sección, menos el esfuerzo de corte debido a la carga permanente.

El término M_{cr} es el momento adicional debido a las cargas aplicadas externamente (excluyendo el provocado por las tensiones debidas al pretensado y a la carga permanente) que provoca una tracción de $6\sqrt{f'_c}$ en la fibra extrema.

El momento adicional M_{cr} se calcula hallando la tensión en la fibra inferior f_{pe} debida únicamente al pretensado, restando la tensión en la fibra inferior f_d debida a las cargas permanentes, sumando la tracción de $6\sqrt{f'_c}$, y multiplicando el resultado por el módulo resistente (I / y_t) de la sección transversal que resiste las sobrecargas. Esto constituye la Ecuación (11-11) del Código.

$$M_{cr} = (I / y_t) (6\sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \quad \text{Ec. (11-11)}$$

Nota: En la discusión anterior, para los elementos continuos el término "inferior" se refiere al "lado traccionado."

El término M_{max} es el máximo momento mayorado en la sección, menos el momento debido a la carga permanente.

La Figura 25-2 permitirá comprender mejor el significado de estos términos y su utilización en la Ecuación (11-10).

El valor $V_i M_{cr} / M_{ax}$ es el corte debido a una carga adicional aplicada externamente (excluyendo la carga permanente) que provoca que la tensión de tracción en la fibra extrema llegue a $6\sqrt{f'_c}$. La carga adicional se aplica a la sección compuesta (si se trata de una sección compuesta).

Una vez que se forma una fisura por flexión, se necesita apenas una pequeña cantidad de corte adicional para que la fisura se transforme en una fisura de corte. Esto se determina de forma empírica, como se ilustra en la Figura 25-3.

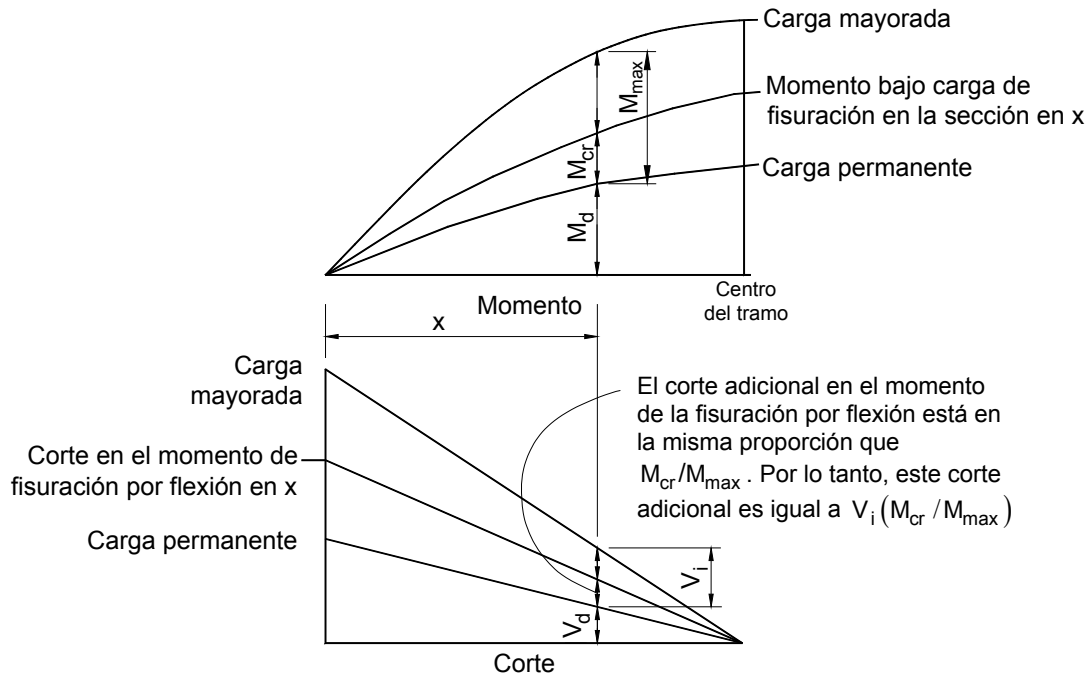


Figura 25-2 – Origen del término $(V_i M_{cr}/M_{max})$ de la Ecuación (11-10)

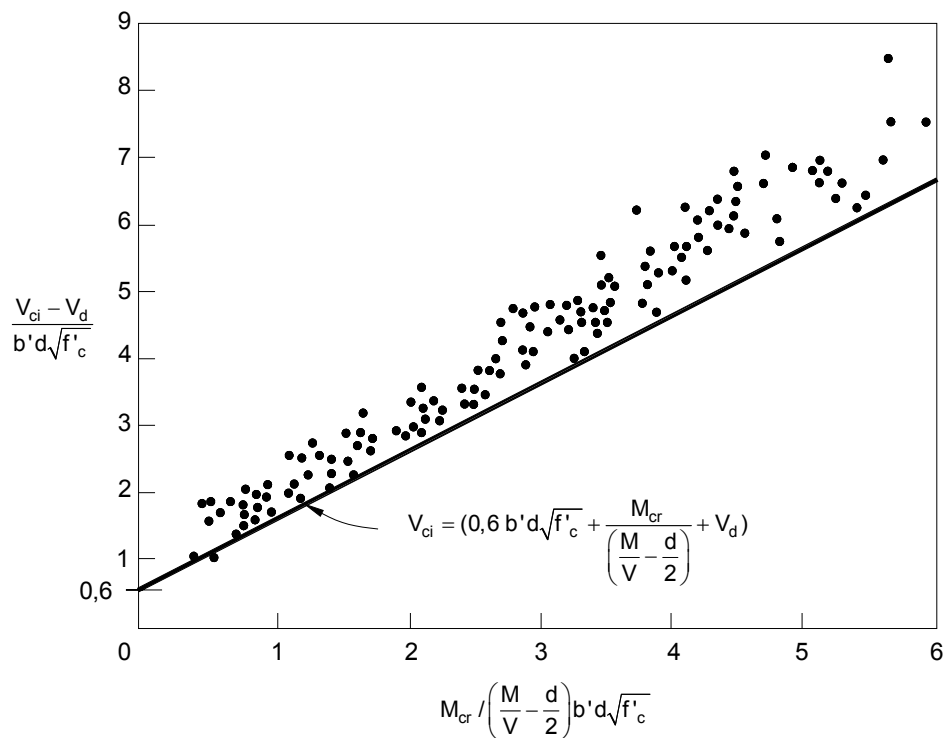


Figura 25-3 – Fisuración diagonal en las regiones de una viga previamente fisuradas por flexión

La intersección en 0,6 produce el primer término de la Ecuación (11-10), $0,6 b_w d \sqrt{f'_c}$.

Nota: El valor " $-d/2$ " que aparece en las expresiones de la Figura 25-3 ha sido eliminado. Esta fue una simplificación conservadora.

La simbología utilizada en las Ecuaciones (11-10) y (11-11) es la siguiente:

M_{cr} = momento que provoca fisuración por flexión en la sección debido a las cargas aplicadas externamente

M_{max} = máximo momento mayorado en la sección debido a las cargas aplicadas externamente

V_i = esfuerzo de corte mayorado en la sección debido a las cargas aplicadas externamente que ocurren simultáneamente con M_{max} .

Desafortunadamente los subíndices se prestan a confusión.

M_{cr} no es el momento de fisuración total. No es el mismo M_{cr} que se utiliza para verificar la armadura mínima en el Ejemplo 24.6.

M_{max} no es el momento mayorado total. Es el momento mayorado total menos el momento debido a la carga permanente.

Parecería que V_i y M_{max} deberían tener el mismo subíndice, ya que ambos se refieren a las diferencias entre los dos mismos estados de cargas.

Una complicación adicional es que el término "cargas aplicadas externamente" es ambiguo. Aparentemente la carga permanente no se considera "aplicada externamente," tal vez porque el peso propio proviene de la masa "interna" del elemento. Sin embargo, el artículo R11.4.2 dice que la carga permanente sobrepuesta en una sección compuesta se debería considerar como una carga aplicada externamente. El comentario lo justifica adecuadamente, pero la confusión persiste.

La resistencia al corte se debe verificar en diferentes ubicaciones a lo largo del tramo de corte, un proceso que resulta tedioso. Para el cálculo manual, el proceso simplificado que se describe en el artículo 11.4.1 es adecuado en la mayoría de los casos.

11.0 SIMBOLOGÍA

Para los elementos pretensados la altura d utilizada en el cálculo de la resistencia al corte se define de la siguiente manera:

d = distancia entre la fibra comprimida extrema y el baricentro de la armadura longitudinal traccionada, pero para las secciones circulares y los elementos pretensados esta distancia debe ser mayor o igual que $0,80h$, in.

El comentario señala que cuando se utiliza el valor mínimo $d = 0,8h$ es recomendable que haya algo de acero próximo a la cara traccionada, confinado por estribos cerrados.

11.1 RESISTENCIA AL CORTE DE LOS ELEMENTOS PRETENSADOS

El requisito básico para el diseño al corte de los elementos pretensados es el mismo que para los elementos no pretensados: en todas las secciones la resistencia al corte de diseño ϕV_n debe ser mayor que el esfuerzo de corte mayorado V_u (11.1).

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

Tanto para los elementos de hormigón armado como para los elementos de hormigón pretensado, la resistencia nominal al corte V_n es la sumatoria de dos componentes: la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón V_c y la resistencia nominal al corte proporcionada por la armadura de corte V_s .

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

Por lo tanto,

$$V_u \leq \phi V_c + \phi V_s$$

Se asume que la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón V_c es igual al corte que existe en el momento en que en el hormigón se forma una fisura diagonal.

A partir del Código de 1977 los requisitos para el diseño al corte se indican en términos de los esfuerzos de corte V_n , V_c y V_s para aclarar mejor la aplicación del factor de reducción de la resistencia de los materiales, ϕ , para el diseño al corte. En el formato basado en los esfuerzos, el factor ϕ se aplica directamente a las resistencias de los materiales, es decir, ϕV_c y ϕV_s .

11.1.2 Resistencia del hormigón

La sección 11.1.2 limita la resistencia del hormigón que se puede utilizar al calcular la contribución del hormigón porque no hay suficientes datos disponibles sobre ensayos de corte correspondientes a hormigones de alta resistencia. El límite no permite que $\sqrt{f'_c}$ sea mayor que 100 psi, lo cual corresponde a $f'_c = 10.000$ psi. Observar que el límite se expresa en términos de $\sqrt{f'_c}$, ya que denota tracción diagonal. Este límite se puede superar si se coloca armadura de corte mínima de acuerdo con lo especificado en el artículo 11.1.2.1.

11.1.3 Ubicación para calcular el máximo esfuerzo de corte mayorado

La sección 11.1.3 permite calcular el máximo esfuerzo de corte mayorado V_u a una determinada distancia de la cara del apoyo siempre que se satisfagan las siguientes condiciones:

- a) la reacción en el apoyo, en la dirección del corte aplicado, introduce compresión en las regiones extremas del elemento,
- b) las cargas se aplican en, o cerca de, la cara superior del elemento, y
- c) no hay cargas concentradas entre la cara del apoyo y la sección crítica.

Para las secciones de hormigón pretensado el artículo 11.1.3.2 establece que la sección crítica para calcular el máximo esfuerzo de corte mayorado V_u está ubicada a una distancia igual a $h/2$ de la cara del apoyo. Este requisito es diferente al correspondiente a los elementos de hormigón armado, en los cuales la sección crítica está ubicada a una distancia igual a d de la cara del apoyo. El Capítulo 12 de esta publicación contiene detalles adicionales sobre el máximo esfuerzo de corte mayorado en los apoyos.

11.2 HORMIGÓN LIVIANO

Los ajustes de la resistencia al corte indicados en la sección 11.2 para el hormigón de agregados livianos también se aplican a los elementos de hormigón pretensado.

11.4 RESISTENCIA AL CORTE PROPORCIONADA POR EL HORMIGÓN EN LOS ELEMENTOS PRETENSADOS

La sección 11.4 presenta dos enfoques para determinar la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón, V_c . El artículo 11.4.1 presenta un enfoque simplificado, mientras que el 11.4.2 presenta un enfoque más detallado. En ambos casos se asume que la resistencia al corte proporcionada por el hormigón es igual al corte que existe en el momento en que en el hormigón se forma una fisura diagonal.

11.4.1 Método simplificado

El uso de este método simplificado se limita a los elementos pretensados en los cuales la fuerza de pretensado efectiva no es menor que el 40 por ciento de la resistencia a tracción de la armadura de flexión, la cual puede estar compuesta exclusivamente por armadura pretensada o bien por una combinación de armadura pretensada y armadura convencional.

$$V_c = \left(0,6\sqrt{f'_c} + 700 \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad \text{Ec. (11-9)}$$

pero debe ser mayor o igual que $2\sqrt{f'_c} b_w d$.

V_c no debe ser mayor que $5\sqrt{f'_c} b_w d$ ó V_{cw} (11.4.2.2) calculado considerando los efectos de la longitud de transferencia (11.4.3) y la falta de adherencia (11.4.4) que se aplican en las regiones próximas a los extremos de los elementos pretensados.

Se debe observar que para el término $V_u d / M_u$ de la Ecuación (11-9) d se debe tomar como la distancia real entre la fibra comprimida extrema y el baricentro de la armadura pretensada, no como el valor $0,8h$ permitido en otros artículos del Código.

Es necesario verificar la resistencia al corte en diferentes ubicaciones a lo largo del tramo. El comentario observa que para el caso de un elemento simplemente apoyado solicitado por cargas uniformes, el valor de $V_u d / M_u$ se puede expresar como:

$$\frac{V_u d}{M_u} = \frac{d(\ell - 2x)}{x(\ell - x)}$$

El comentario también presenta la Figura 25-4, útil para resolver el problema gráficamente.

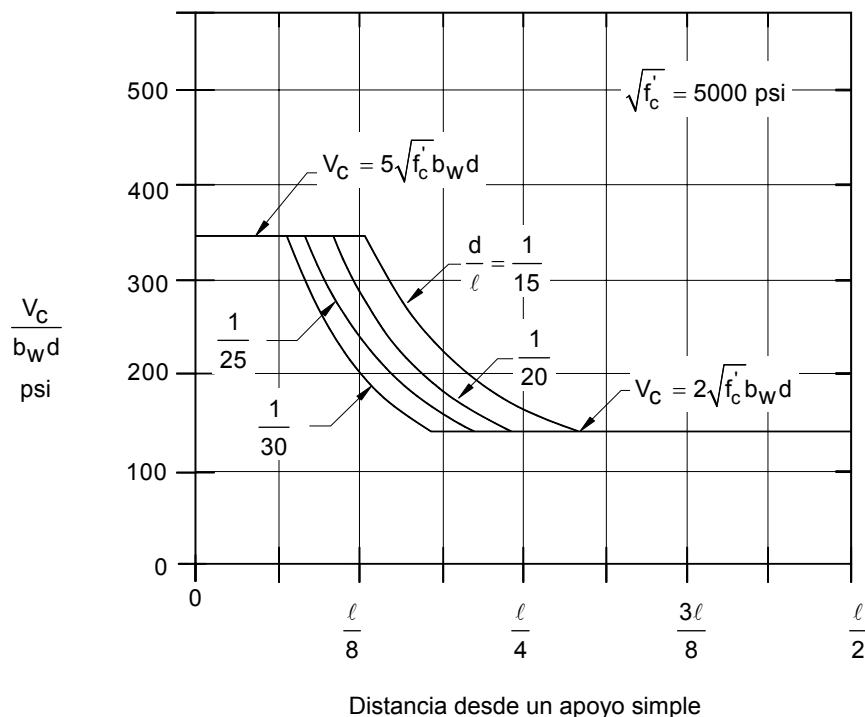


Figura 25-4 – Aplicación de la Ecuación (11-9) a elementos pretensados con carga uniforme (Figura R11.4.1)

El uso de esta figura se ilustra en el Ejemplo 25-2. La Referencia 25.1 contiene figuras adicionales para la resolución gráfica de la resistencia al corte.

11.4.2 Método detallado

El origen de este método se discute bajo el título "Consideraciones generales," al comienzo de este capítulo.

En los elementos de hormigón pretensado se han observado dos tipos de fisuración diagonal: fisuración de corte por flexión y fisuración por corte en el alma. Debido a que se asume que la resistencia al corte nominal del hormigón es igual al corte que provoca la fisuración diagonal del hormigón, el método detallado proporciona ecuaciones que permiten determinar la resistencia nominal al corte para ambos tipos de fisuración.

En la Figura 25-5, tomada de R11.4.2, se ilustran los dos tipos de fisuración diagonal. La resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón, V_c , se toma como el menor de los valores de corte que provocan estos tipos de fisuración, los cuales se discuten a continuación. Las expresiones detalladas para calcular V_c indicadas en el artículo 11.4.2 pueden resultar de difícil aplicación sin el auxilio de ayudas para el diseño, y sólo se deberían utilizar cuando la expresión simplificada para V_c indicada en el artículo 11.4.1 no resulta adecuada.

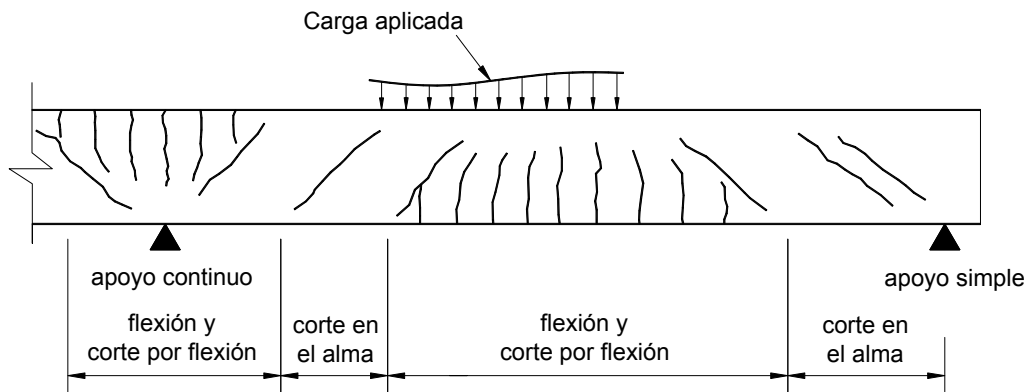


Figura 25-5 – Tipos de fisuración en una viga de hormigón (Figura R11.4.2)

11.4.2.1 Fisuración de corte por flexión, V_{ci} – La fisuración de corte por flexión ocurre cuando las fisuras provocadas por flexión, que inicialmente son verticales, se inclinan por efecto del corte. El esfuerzo de corte para el cual esto ocurre se puede tomar como:

$$V_{ci} = 0,6\sqrt{f'_c} b_w d + V_d + \frac{V_i M_{cr}}{M_{max}} \quad \text{Ec. (11-10)}$$

Observar que V_{ci} se debe tomar mayor o igual que $1,7\sqrt{f'_c} b_w d$.

El momento adicional, M_{cr} , que provoca la fisuración por flexión se calcula usando la siguiente expresión:

$$M_{cr} = \left(\frac{I}{y_t} \right) (6\sqrt{f'_c} + f_{pe} - f_d) \quad \text{Ec. (11-11)}$$

donde f_{pe} es la tensión de compresión en el hormigón debida únicamente a la fuerza efectiva de pretensado (luego de descontar todas las pérdidas de pretensado) en la fibra extrema de una sección donde la tensión de tracción es provocada por cargas aplicadas externamente.

En general V_{ci} resulta determinante en los elementos cargados uniformemente. Se asume que la resistencia nominal al corte total, V_{ci} , es igual a la sumatoria de tres componentes:

1. el esfuerzo de corte requerido para transformar una fisura por flexión en una fisura diagonal: $0,6\sqrt{f'_c} b_w d$;
2. el esfuerzo de corte debido a la carga permanente no mayorada: V_d ; y
3. la porción del esfuerzo de corte mayorado restante que provocará la aparición inicial de una fisura por flexión: $V_i M_{cr} / M_{max}$.

Para los elementos no compuestos V_d es el esfuerzo de corte provocado por la carga permanente no mayorada. Para los elementos compuestos V_d se calcula usando el peso propio no mayorado más la carga permanente sobreimpuesta no mayorada.

La combinación de cargas usada para determinar V_i y M_{max} es aquella que provoca el máximo momento en la sección considerada. El valor V_i es el esfuerzo de corte mayorado provocado por las cargas aplicadas externamente que ocurren simultáneamente con M_{max} . Para los elementos compuestos V_i se puede determinar restando V_d del esfuerzo de corte provocado por las cargas mayoradas totales, V_u . De manera similar, $M_{max} = M_n - M_d$. Al calcular el momento de fisuración, M_{cr} , la carga usada para determinar f_d es la misma carga no mayorada usada para calcular V_d .

11.4.2.2 Fisuración por corte en el alma, V_{cw} – La fisuración por corte en el alma se produce cuando la tensión principal de tracción diagonal en el alma supera la resistencia a la tracción del hormigón. Este corte es aproximadamente igual a

$$V_{cw} = (3,5\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc}) b_w d + V_p \quad \text{Ec. (11-12)}$$

donde f_{pc} es la tensión de compresión en el hormigón (después de descontar todas las pérdidas de pretensado) en el baricentro de la sección transversal que resiste las cargas aplicadas externamente, o en la unión del ala y el alma si el baricentro se encuentra dentro del ala.

V_p es la componente vertical de la fuerza efectiva de pretensado, la cual sólo existe si los cables tienen perfil curvo.

La expresión para la resistencia al corte correspondiente a fisuración en el alma V_{cw} generalmente es determinante en el caso de las vigas de alma delgada fuertemente pretensadas, particularmente si éstas soportan grandes cargas concentradas cerca de un apoyo simple. La Ecuación (11-12) permite calcular la resistencia al corte correspondiente a la primera fisuración por corte en el alma.

Un método alternativo para determinar la resistencia al corte correspondiente a la fisuración en el alma, V_{cw} , consiste en calcular el esfuerzo de corte correspondiente a la carga permanente más la sobrecarga que provoca una tensión principal de tracción de $4\sqrt{f'_c}$ en el eje baricéntrico del elemento, o en la interfase entre el alma y el ala si el baricentro está ubicado en el ala. Este método alternativo puede resultar útil para diseñar elementos en los cuales el corte es crítico. Observar la limitación de V_{cw} en las regiones extremas de los elementos pretensados según lo indicado en los artículos 11.4.3 y 11.4.4.

11.4.3, 11.4.4 Consideraciones especiales para elementos pretensados

El artículo 11.4.3 se aplica a situaciones en las cuales la sección crítica ubicada a una distancia $h/2$ desde la cara del apoyo se encuentra dentro de la longitud de transferencia de los cables de pretensado. Esto significa que no toda la fuerza efectiva de pretensado está disponible para contribuir a la resistencia al corte. Es necesario utilizar un valor reducido de la fuerza efectiva de pretensado, suponiendo que la fuerza de pretensado varía linealmente entre cero en el extremo de los cables hasta un valor máximo que se ubica a una distancia a partir del extremo de los cables igual a la longitud de transferencia, la cual se toma igual a 50 diámetros ($50d_b$) para los cordones y 100 d_b para los alambres individuales.

El artículo 11.4.4 se incluye para asegurar que el efecto de la tensión de pretensado reducida sobre la resistencia al corte se considere adecuadamente cuando intencionalmente se impide la adherencia de algunos de los cables cerca de los extremos de un elemento pretensado, tal como lo permite el artículo 12.9.3.

11.5 RESISTENCIA AL CORTE PROPORCIONADA POR LA ARMADURA DE CORTE EN LOS ELEMENTOS PRETENSADOS

El diseño de la armadura de corte de los elementos pretensados se realiza igual que para los elementos no pretensados, como se discute en el Capítulo 12 de esta publicación, excepto que V_c se calcula de manera diferente (tal como se discutió en párrafos precedentes) y se establece un requisito adicional de armadura de corte mínima (11.5.5.4). El Capítulo 12 contiene una discusión completa del diseño de la armadura de corte.

11.5.5.1 El Código permite una separación ligeramente mayor igual a $(3/4)h$ (en lugar de $d/2$) para los elementos pretensados, debido a que en estos elementos la inclinación de las fisuras de corte es menor.

Según lo permite el artículo 11.5.5.2, se puede omitir la armadura de corte en cualquier elemento si se demuestra mediante ensayos físicos que la resistencia requerida se puede desarrollar sin armadura de corte. El artículo 11.5.5.2 aclara las condiciones necesarias para que un ensayo se considere adecuado. Además, la discusión incluida en el comentario resalta la necesidad de colocar suficientes estribos en los elementos postesados de alma delgada para mantener los cables dentro del perfil de diseño, y para proveer armadura para las tensiones de tracción provocadas en las almas por las desviaciones de los cables respecto de sus perfiles de diseño.

11.5.5.4 Armadura mínima para los elementos pretensados – Para los elementos pretensados, la armadura mínima de corte se calcula como el menor valor obtenido de las Ecuaciones (11-13) y (11-14). Sin embargo, en general con la Ecuación (11-13) se obtendrá un mínimo más elevado que con la Ecuación (11-14). Observar que la Ecuación (11-14) no se puede utilizar para los elementos en los cuales la fuerza efectiva de pretensado es menor que el 40 por ciento de la resistencia a tracción de la armadura pretensada.

REFERENCIA

- 25.1 "PCI Design Handbook – Precast and Prestressed Concrete," MNL 120-92, 5ª Edición, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1999, p. 630.

Ejemplo 25.1 – Diseño al corte (11.4.1)

Dada la viga Te pretensada ilustrada, determinar los requisitos de corte usando V_c de acuerdo con la Ecuación (11-9).

Hormigón prefabricado: $f'_c = 5000$ psi (hormigón de agregados livianos y arena, $w_c = 120$ lb/ft³)

Hormigón de la capa de compresión: $f'_c = 4000$ psi (hormigón de peso normal, $w_c = 150$ lb/ft³)

Acero de pretensado: Doce cordones de 1/2 in. de diámetro, 270 ksi (depresión única en el centro del tramo)

Luz = 60 ft (tramo simple)

Carga permanente = 725 lb/ft (incluye la capa de compresión)

Sobrecarga = 720 lb/ft

f_{se} (después de todas las pérdidas) = 150 ksi

Sección prefabricada:

$$A = 570 \text{ in.}^2$$

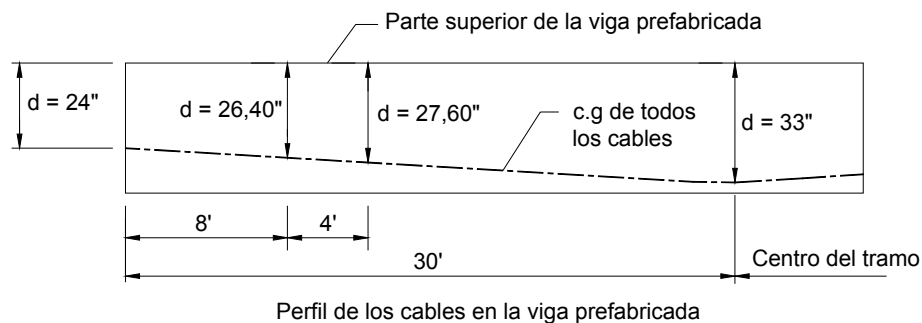
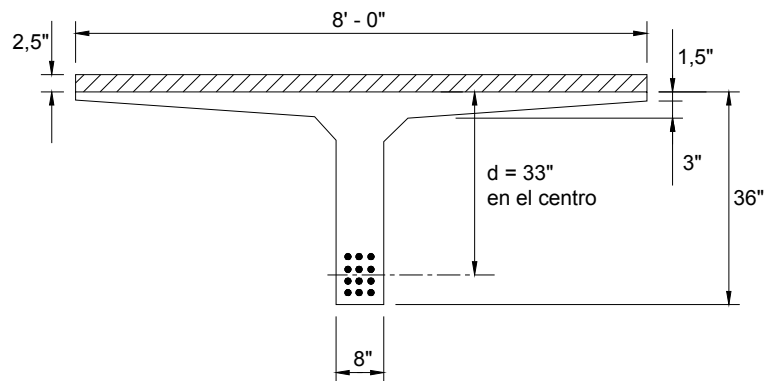
$$I = 68.917 \text{ in.}^4$$

$$y_b = 26,01 \text{ in.}$$

$$y_t = 9,99 \text{ in.}$$

Sección compuesta:

$$y_{bc} = 29,27 \text{ in.}$$



Cálculos y discusión

Referencia del Código

- Determinar el esfuerzo de corte mayorado V_u en diferentes ubicaciones a lo largo del tramo. Los resultados se presentan en la Figura 27-2.
- Determinar la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, V_c , usando la Ecuación (11.9). La fuerza de pretensado efectiva f_{se} es mayor que 40 por ciento de f_{pu} ($150 \text{ ksi} > 0,40 \times 270 = 108 \text{ ksi}$). Observar que el valor de d debe ser mayor o igual que $0,8h$ para el cálculo de la resistencia al corte. El cálculo típico usando la Ecuación (11-9) para una sección ubicada a 8 pies del apoyo se realiza de la siguiente manera, suponiendo que el corte es resistido exclusivamente por el alma de la sección prefabricada:

11.4.1

11.0

$$w_u = 1,2(0,725) + 1,6(0,720) = 2,022 \text{ kips/ft}$$

$$V_u = \left[\left(\frac{60}{2} \right) - 8 \right] 2,022 = 44,5 \text{ kips}$$

$$M_u = 30 \times 2,022 \times 8 - 2,022 \times 8 \times 4 = 421 \text{ ft-kips}$$

Para la sección no compuesta, a una distancia de 8 pies del apoyo, determinar la distancia **d** al baricentro de los cables.

$d = 26,40 \text{ in.}$ (ver el perfil de los cables)

Para la sección compuesta, $d = 26,4 + 2,5 = 28,9 \text{ in.} < 0,8h = 30,8 \text{ in.}$ usar $d = 30,8 \text{ in.}$

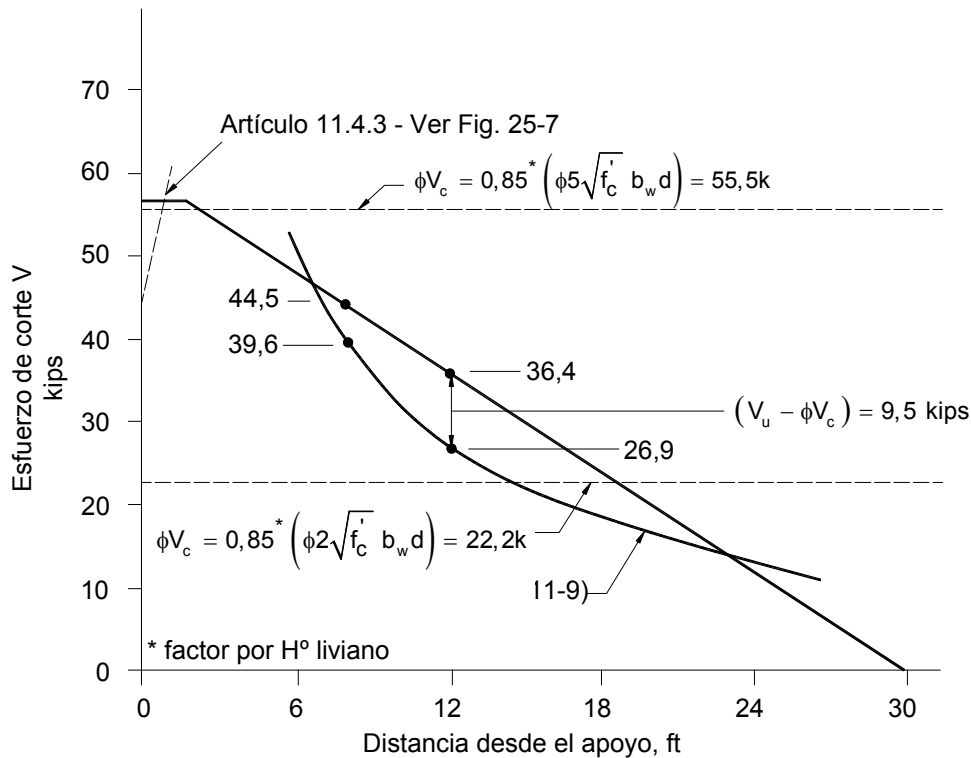


Figura 25-6 – Variación del esfuerzo de corte a lo largo del elemento

$$V_c = \left(0,6 \sqrt{f'_c} + 700 \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad \text{Ec. (11-9)}$$

pero no menor que $2 \sqrt{f'_c} b_w d$ 11.4.1

ni mayor que $5 \sqrt{f'_c} b_w d$ 11.4.1

Debido a que la sección prefabricada es de hormigón de agregados livianos y arena, todos los términos que contienen el factor $\sqrt{f'_c}$ se deben reducir aplicando el factor 0,85. 11.2.1.2

Nota: En el término $V_u d / M_u$ se debe utilizar la altura efectiva total, $d = 28,9$ in., y no el valor $0,8h$ utilizado en otros cálculos. 11.4.1

$$V_c = \left(0,6 \times 0,85 \sqrt{5000} + 700 \times 44,5 \times 28,90 / (421 \times 12) \right) 8 \times 30,8$$

$$= (36 + 178) 8 \times 30,8 = 52,8 \text{ kips} \quad (\text{valor determinante})$$

$$\geq 2 \times 0,85 \sqrt{5000} \times 8 \times 30,8 = 29,6 \text{ kips}$$

$$\leq 5 \times 0,85 \sqrt{5000} \times 8 \times 30,8 = 74,0 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = 0,75 \times 52,8 = 39,6 \quad (\text{ver Figura 25-6}) \quad \text{11.2.1.2}$$

Nota: Para los elementos simplemente apoyados solicitados por cargas uniformes, en la Ecuación (11-9) el valor de $V_u d / M_u$ se convierte simplemente en una función de d/ℓ , siendo ℓ la longitud del tramo,

$$V_c = \left[0,6 \sqrt{f'_c} + 700d \frac{(\ell - 2x)}{x(\ell - x)} \right] b_w d \quad \text{Ec. (11-9)}$$

donde x es la distancia desde el apoyo hasta la sección investigada. A una distancia de 8 pies del apoyo:

$$V_c = \left[0,6 \times 0,85 \sqrt{5000} + 700 \times 28,90 \frac{(60 - 16)}{8(60 - 8)12} \right] 8 \times 30,8 = 52,8 \text{ kips}$$

3. En la región de los extremos de los elementos pretensados la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, V_c , se puede limitar de acuerdo con los requisitos del artículo 11.4.3. Para este diseño no se aplica el artículo 11.4.3 ya que la sección crítica ubicada a $h/2$ está a una distancia mayor que la longitud de transferencia (ver Figura 25-7). Sin embargo, a continuación se ilustran los cálculos típicos para satisfacer 11.4.3. Calcular V_c en la cara del apoyo, a 10 in. del extremo del elemento.

$$\text{Longitud de transferencia para los cordones de } 1/2 \text{ in. de diámetro} = 50 (0,5) = 25 \text{ in.} \quad \text{11.4.3}$$

$$\text{Fuerza de pretensado a 10 in.: } P_{se} = (10 / 25) 150 \times 0,153 \times 12 = 110,2 \text{ kips}$$

Componente vertical de la fuerza de pretensado a 10 in.:

$$\text{pendiente} = \frac{(d_{\text{centro}} - d_{\text{extremo}})}{\frac{\ell}{2}} = \frac{(33 - 24)}{30 \times 12} = 0,025$$

$$V_p \approx P \times \text{pendiente} = (110,2)(0,025) = 2,8 \text{ kips}$$

$$\text{Para la sección compuesta, } d = 28,90 \text{ in.; usar } 0,8h = 30,8 \text{ in.} \quad \text{11.4.2.3}$$

$$M_d \text{ (peso propio no mayorado de la unidad prefabricada + capa de compresión)} = 214,4 \text{ in.-kips}$$

Distancia desde el baricentro de la sección compuesta hasta el baricentro de la unidad prefabricada,

$$c = y_{bc} - y_b = 29,27 - 26,01 = 3,26 \text{ in.}$$

$$\begin{aligned} \text{Excentricidad de los cables, } e &= d_{\text{extremo}} + 10 \text{ in.} \times \text{pendiente} - y_t = 24 + 10 \times 0,025 - 9,99 \\ &= 14,26 \text{ in. debajo del baricentro de la sección prefabricada} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{pc} \text{ (ver definición en la simbología)} &= \frac{P}{A_g} - (Pe) \frac{c}{I_g} + M_d \frac{c}{I_g} \\ &= \frac{110,2}{570} - 110,2(14,26) \left(\frac{3,26}{68.917} \right) + 214,4 \left(\frac{3,26}{68.917} \right) = 129 \text{ psi} \end{aligned}$$

donde A_g e I_g corresponden a la sección prefabricada solamente.

$$V_{cw} = (3,5\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc})b_w d + V_p \quad \text{Ec. (11-12)}$$

$$= (3,5 \times 0,85\sqrt{5000} + 0,3 \times 129)8 \times 30,8 + 2800 = 63,4 \text{ kips}$$

$$\phi V_{cw} = 0,75 \times 63,4 = 47,6 \text{ kips}$$

En la Figura 25-7 se grafican los resultados de este análisis.

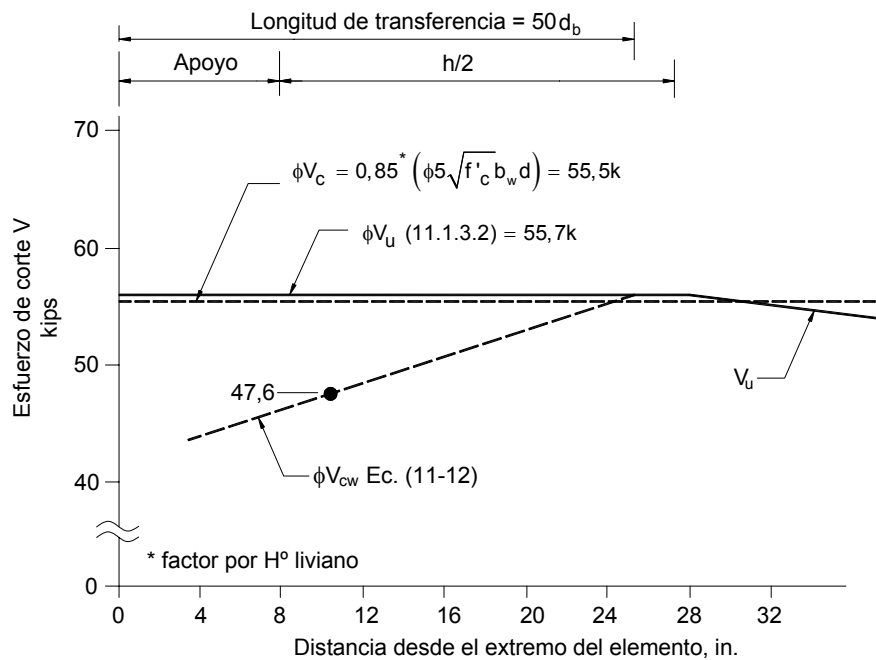


Figura 25-7 – Variación del esfuerzo de corte en el extremo del elemento

- Comparar el esfuerzo de corte mayorado, V_u , con la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, ϕV_c . Si $V_u > \phi V_c$ es necesario colocar armadura de corte para tomar el exceso. También se deben verificar los requisitos de armadura mínima.

La armadura de corte requerida a 12 ft del apoyo se calcula de la siguiente manera:

$$d = 30,10 \text{ in. (para en el término } V_u d / M_u)$$

$$M_u = 30 \times 2,24 \times 12 - 2,24 \times 12 \times 6 = 645 \text{ ft-kips}$$

$$V_u \left[\left(\frac{60}{2} \right) - 12 \right] 2,022 = 36,4 \text{ kips}$$

$$V_c = \left(0,6 \times 0,85 \sqrt{5000} + 700 \times 40,3 \times 30,10 / (645 \times 12) \right) 8 \times 30,8 = 35,9 \text{ kips}$$

$$\phi V_c = 0,75 \times 35,9 = 26,9 \text{ kips}$$

$$A_v = \frac{(V_u - \phi V_c) s}{\phi f_y d} = \frac{(36,4 - 26,9) 12}{0,75 \times 60 \times 30,8} = 0,082 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

Verificar la armadura mínima requerida por los artículos 11.5.5.3 y 11.5.5.4.

$$A_v (\text{min}) = 0,75 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_y} = 0,75 \sqrt{5000} \left(\frac{8 \times 12}{60.000} \right) = 0,085 \text{ in.}^2 / \text{ft} \quad \text{Ec. (11-13)}$$

pero no menor que $50 \frac{b_w s}{f_y}$ (no es determinante para $f'_c > 4444 \text{ psi}$)

$$A_v (\text{min}) = \frac{A_{ps}}{80} \frac{f_{pu}}{f_y} \frac{s}{d} \sqrt{\frac{d}{b_w}} \quad \text{Ec. (11-14)}$$

$$= \frac{1,84}{80} \times \frac{270}{60} \times \frac{12}{30,8} \sqrt{\frac{30,8}{8}} = 0,079 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

Se puede usar el menor de los valores de $A_v (\text{min})$ obtenidos de las Ecuaciones (11-13) y (11-14)

A_v requerida es ligeramente mayor que A_v mínima

Máxima separación de los estribos = $3/4d = (3/4) \times 30,8 = 23,1 \text{ in.}$

Usar estribos No. 3 con una separación de 18 in. en toda la longitud del elemento ($A_v = 0,147 \text{ in.}^2 / \text{ft}$)

Ejemplo 25.2 – Diseño al corte usando la Figura 25-4

Determinar la armadura de corte para la viga del ejemplo 24.9.

$f'_c = 6000$ psi

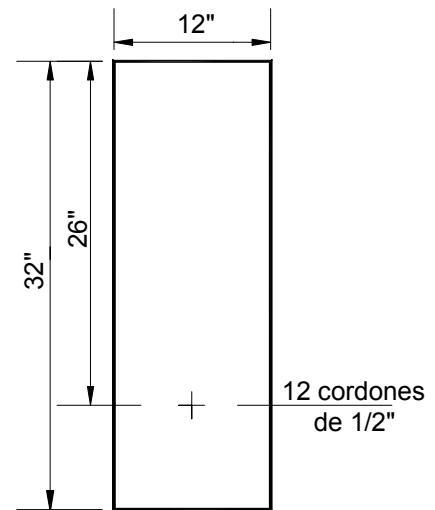
altura $d_p = 26$ in.

tensión efectiva de pretensado $f_{se} = 150$ ksi

tensión de descompresión $f_{dc} = 162$ ksi

luz = 40 ft

	w k/ft	Momentos en el centro de la luz in.-k
Peso propio	0,413	992
Carga permanente adicional	1,000	2400
Sobrecarga	1,250	3000
Sumatoria	2,663	6392



Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Calcular el esfuerzo de corte mayorado en el apoyo.

$$V_u = 1,2D + 1,6L = \left[1,2(0,413 + 1000) + 1,6(1,250) \right] \times \frac{40}{2} \\ = 73,9 \text{ kips}$$

2. Antes de utilizar la Figura 25-4:

Nota: La Figura 25-4 corresponde a $f'_c = 5000$ psi .

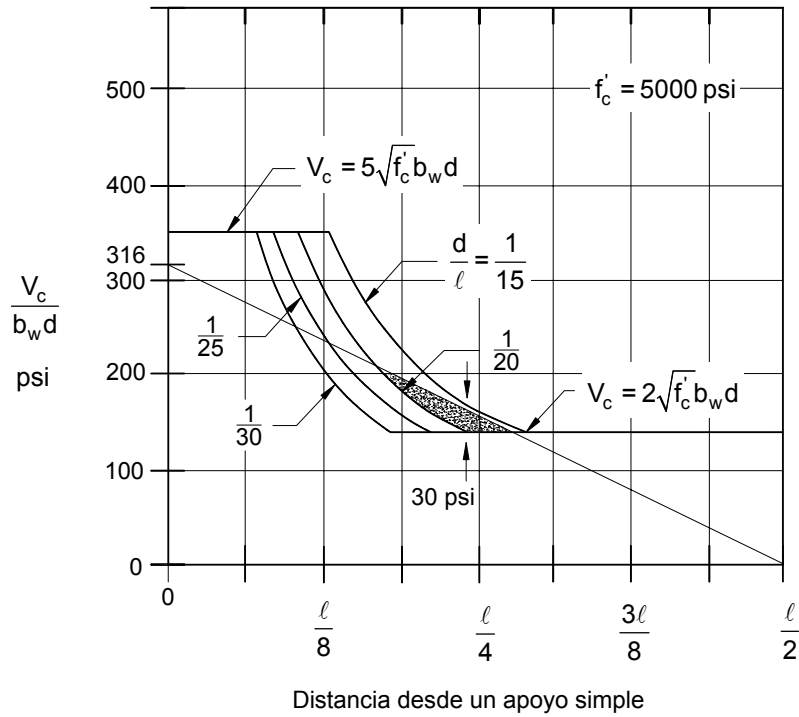
Usarla para $f'_c = 6000$ psi será conservador en aproximadamente diez por ciento.

$$d/\ell = 26/480 = 1/18,5$$

Usar la curva para $\ell/d = 1/20$

$$\frac{V_u}{\phi b_w d} = \frac{73,9}{0,75 \times 12 \times 26} = 0,316 \text{ ksi} = 316 \text{ psi}$$

3. Trazar la recta correspondiente a la resistencia al corte nominal requerida en la Figura 25-4, y hallar V_s requerida.



El área sombreada corresponde al área donde se requiere armadura de corte. La máxima tensión de corte nominal a ser resistida por la armadura de corte es 29 psi.

$$V_s = 0,03 \text{ ksi} \times b \times d = 0,030 \times 12 \times 26 = 9,4 \text{ kips}$$

$$A_v = \frac{V_s s}{f_y d} = \frac{9,4 \times 12}{60 \times 26} = 0,07 \text{ in.}^2 / \text{ft} \quad \text{Ec. (11-15)}$$

4. Verificar la armadura mínima.

$$A_v = 0,75 \sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{f_y}, \text{ pero no menor que} \quad \text{Ec. (11-13)}$$

$$50 \frac{b_w s}{f_y}$$

$$0,75 \sqrt{6000} = 58,1 \quad \text{es el valor determinante}$$

$$A_v = 58,1 \times 12 \times 12 / 60.000 = 0,14 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

$$A_v = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d}{b_w}} \quad \text{Ec. (11-14)}$$

$$A_v = \frac{1,836 \times 270 \times 12}{80 \times 60 \times 26} \sqrt{\frac{26}{12}} = 0,07 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

Se puede usar el menor de los valores de A_v obtenidos mediante las Ecuaciones (11-13) y (11-14), pero no menor que el valor de A_v requerida.

5. Seleccionar los estribos.

$$A_v = 0,07 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

$$s \text{ máxima} = (3/4)d \leq 24 \text{ in.}$$

11.5.4.1

$$s = (3/4)(26) = 19,5 \text{ in.}$$

Usar estribos dobles No. 3 cada 18 in.

$$A_v = 0,22 / 1,5 = 0,15 \text{ in.}^2 / \text{ft} \quad \text{VERIFICA}$$

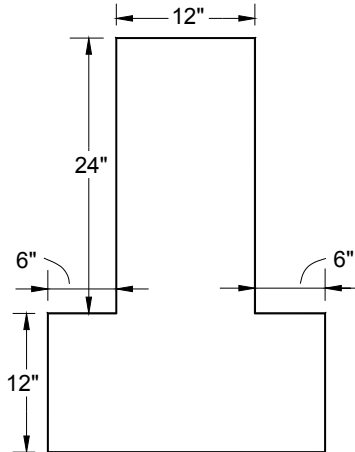
Esto se requiere donde V_u es mayor que $\phi V_c / 2$.

11.5.5.1

La mayoría de los diseñadores colocarían esta armadura en toda la longitud del elemento.

Ejemplo 25.3 – Diseño al corte aplicando el artículo 11.4.2

Dada la viga simple con retallo horizontal pretensada ilustrada, determinar los requisitos de corte usando V_c según las Ecuaciones (11-10) y (11-12).



$$\begin{aligned}
 A &= 576 \text{ in.}^2 & w_d &= 5,486 \text{ kips/ft} \\
 I &= 63.936 \text{ in.}^4 & w_\ell &= 5,00 \text{ kips/ft} \\
 h &= 36 \text{ in.} \\
 y_b &= 15 \text{ in.} \\
 f'_c &= 6 \text{ ksi} \\
 \ell &= 24 \text{ ft} \\
 16 \text{ cordones de } 1/2 \text{ in. de Grado 270 ksi, } P &= 396,6 \text{ kips} \\
 e_{\text{extr}} (\text{extremo}) &= e_{\text{c.L.}} (\text{centro de la luz}) = 10 \text{ in.}
 \end{aligned}$$

Cálculos y discusión

Referencia del Código

Para facilitar los cálculos es necesario sistematizar el procedimiento.

1. Determinar los momentos en el centro de la luz y los esfuerzos de corte en los extremos.

$$M_d = w_d \ell^2 / 8 = 5,486 \times 24^2 / 8 = 395 \text{ ft-kips} = 4740 \text{ in.-kips}$$

$$M_\ell = w_\ell \ell^2 / 8 = 5,00 \times 24^2 / 8 = 360 \text{ ft-kips} = 4320 \text{ in.-kips}$$

$$M_u = 1,2M_d + 1,6M_\ell = 1,2 \times 4740 + 1,6 \times 4320 = 12.600 \text{ in.-kips} \quad \text{Ec. (9-2)}$$

$$M_{\text{max}} = M_u - M_d = 12.600 - 4740 = 7860 \text{ in.-kips} \quad 11.0$$

$$V_d = w_d \ell / 2 = 5486 \times 24 / 2 = 65,8 \text{ kips}$$

$$V_\ell = w_\ell \ell / 2 = 5 \times 24 / 2 = 60,0 \text{ kips}$$

$$V_u = 1,2V_d + 1,6V_\ell = 1,2 \times 65,8 + 1,6 \times 60 = 175,0 \text{ kips} \quad \text{Ec. (9-2)}$$

$$V_i = V_u - V_d = 175 - 65,8 = 109,2 \text{ kips} \quad 11.0$$

2. Definir los factores para convertir los momentos en el centro de la luz y los cortes en los extremos en momentos y cortes a una distancia x/ℓ del apoyo, para $x/\ell = 0,3$.

$$\text{Factor para } V = 1 - 2(x/\ell) = 1 - 2(0,3) = 0,4$$

$$\text{Factor para } M = 4\left(x/\ell - (x/\ell)^2\right) = 4 \times (0,3 - 0,3^2) = 0,84$$

3. Calcular V_3 , el tercer término de la Ecuación (11-10).

$$P/A = 396,6/576 = 0,689$$

$$P_e/S_b = 396,6 \times 10/4262 = 0,930$$

$$-M_d/S_b = 0,84M_{d(cL)}/S_b = -0,934$$

$$+6\sqrt{f'_c} = 6\sqrt{6000} = 465 \quad \underline{= 0,465} \\ 1,150 \text{ ksi}$$

$$M_{cr} = S_b (1150 \text{ ksi}) = 4900 \text{ in.-kips} \quad \text{Ec. (11-11)}$$

$$V_i = 0,4V_{i(\text{extr.})} = 0,4 \times 109,2 = 43,7 \text{ kips}$$

$$M_{\max} = 0,84M_{\max(c.L.)} = 0,84 \times 7860 = 6602 \text{ in.-kips}$$

$$V_3 = \frac{V_i M_{cr}}{M_{\max}} = \frac{43,7 \times 4900}{6602} = 32,4 \text{ kips} \quad \text{Ec. (11-10)}$$

4. Calcular los términos restantes, V_1 y V_2 , de la Ecuación (11-10), y resolver para V_{ci} Ec. (11-10)

$$d = 31, \text{ pero no menor que } 0,8d = 28,8. \text{ Usar } d = 31 \quad 11-0$$

$$V_1 = 0,6 b_w d \sqrt{f'_c} = 0,6 \times 12 \times 31 \sqrt{6000} = 17,3 \text{ k}$$

$$V_2 = V_d = 0,4(V_{d\text{extr.}}) = 0,4 \times 65,8 = 26,3 \text{ kips}$$

$$V_{ci} = V_1 + V_2 + V_3 = 17,3 + 26,3 + 32,4 = 76,0 \text{ kips} \quad \text{Ec. (11-10)}$$

5. Calcular V_u , y determinar el V_s a ser resistido por estribos.

$$V_u = 0,4V_u(\text{extremo}) = 0,4 \times 175,0 = 70 \text{ kips}$$

$$\phi \text{ para corte} = 0,75 \quad 9.3.2.3$$

$$V_s = V_n - V_c = V_u / \phi - V_c = 70/0,75 - 76 = 17,3 \text{ kips} \quad \text{Ec. (11-2)}$$

6. Determinar los estribos requeridos.

$$A_v = \frac{V_s s}{f_y d} = \frac{17,3 \times 12}{60 \times 31} = 0,11 \text{ in.}^2 / \text{ft}$$

Requisitos mínimos.

$$A_v = 0,75\sqrt{f'_c} b_w s / f_y \text{ cuando } f'_c > 4444 \text{ psi} \quad \text{Ec. (11-13)}$$

$$= 0,75\sqrt{6000} \times 12 \times 12 / 60.000 = 0,14 \text{ in.}^2$$

$$A_v = \frac{A_{ps} f_{pu} s}{80 f_y d} \sqrt{\frac{d}{b_w}} = \frac{2,448 \times 270 \times 12}{80 \times 60 \times 31} \sqrt{\frac{31}{12}} = 0,086 \text{ in.}^2 \quad \text{Ec. (11-13)}$$

El mínimo sólo debe ser el menor de los valores requeridos por las Ecuaciones (11-13) o (11-14). 11.5.5.4

De manera que la A_v requerida de $0,09 \text{ in.}^2 / \text{ft}$ es el valor determinante.

$$\text{Separación máxima} = (3/4)d = (3/4)31 = 23,25 \text{ in.}$$

Adoptamos barras dobles No. 3 con una separación de 18 in., $A_v = 2 \times 0,11 / 1,5 = 0,15 \text{ in.}^2 / \text{ft}$

7. Calcular la armadura de corte requerida en el apoyo.

Debido a que la viga entallada está cargada en las entalladuras, y no "cerca de la parte superior," el corte se debe verificar en el apoyo y no a una distancia $h/2$ del apoyo (para los elementos pretensados). 11.1.3

Por motivos de simplicidad suponemos que en el apoyo la fuerza de pretensado P es nula.

$$V_{cw} = (3,5\sqrt{f'_c} + 0,3f_{pc}) b_w d + V_p \quad \text{Ec. (11-12)}$$

$$= (3,5\sqrt{6000}) \times 12 \times 31 = 100,9 \text{ kips}$$

$$V_s = V_n - V_c = V_u / \phi - V_c = 175 / 0,75 - 100,9 \quad \text{Ec. (11-12)}$$

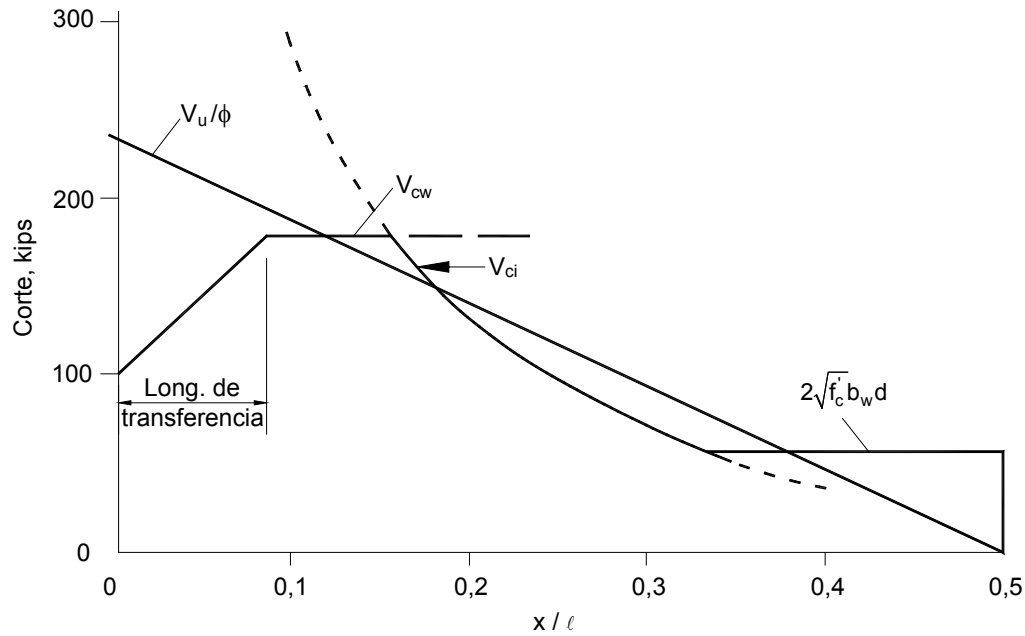
$$V_s = 132,4 \text{ k}$$

$$A_v = \frac{V_s s}{f_y d} = \frac{132,4 \times 12}{60 \times 31} = 0,85 \text{ in.}^2 \quad \text{Ec. (11-14)}$$

Adoptamos barras dobles No. 4 con una separación de 4 in., $A_v = 0,40 / 0,33 = 1,20 \text{ in.}^2 / \text{ft}$ cerca del extremo.

Con referencia al Paso 6, esto está por encima de los requisitos mínimos.

8. Repetir el proceso descrito para diferentes secciones a lo largo del tramo del corte.
Los resultados se ilustran a continuación.



Nota: Se utilizó el V_c mínimo de $2\sqrt{f'_c}b_wd$ permitido por el artículo 11.4.1.

9. Notas:

1. Se puede preparar una planilla de cálculo en la cual cada columna contenga datos para diferentes valores de x/ℓ y los factores para corte y momento del Paso 2.
2. Para los elementos con cables de perfil curvo, en el Paso 2 es necesario aplicar factores adicionales para tomar en cuenta la variación de la excentricidad, profundidad y pendiente de los tendones (para el cálculo de V_p).
3. Para los elementos compuestos, es necesario separar las partes de la carga permanente aplicadas antes y después de llegar al comportamiento compuesto. La carga permanente aplicada después que la viga se vuelve compuesta no se debe incluir en los términos V_d y M_d . Ver el artículo R11.4.2.