

14

Corte por Fricción

CONSIDERACIONES GENERALES

Cuando se publicó el documento ACI 318-83, el artículo 11.7 fue rescrito completamente para ampliar el concepto de corte por fricción de manera que incluyera aplicaciones en las cuales (1) la armadura de corte por fricción se coloca formando un ángulo diferente de 90 grados respecto del plano de corte, (2) el hormigón se coloca contra hormigón que no se ha hecho intencionalmente rugoso, y (3) se utiliza hormigón liviano. Además, se agregó una frase para permitir "cualquier otro método de diseño para transferencia del esfuerzo de corte" sustentado por ensayos. Es importante observar que el artículo 11.9 refiere al artículo 11.7 para la transferencia de corte directo en ménsulas y cartelas; ver la Parte 15.

11.7 CORTE POR FRICCIÓN

El concepto de corte por fricción constituye una herramienta de gran utilidad para diseñar elementos para corte directo cuando no es adecuado diseñar para tracción diagonal, como en el caso de las uniones prefabricadas, y en ménsulas y cartelas. El concepto se puede aplicar de forma sencilla, y le permite al diseñador visualizar el comportamiento estructural dentro del elemento o la unión. El enfoque consiste en suponer que se producirá una fisura en una ubicación predeterminada, como se ilustra en la Figura 14-1. A medida que comienza a producirse desplazamiento a lo largo de la fisura, la rugosidad de las superficies de la fisura obliga a las caras opuestas de la fisura a separarse. Esta separación es resistida por la armadura (A_{vf}) que atraviesa la fisura supuesta. La fuerza de tracción ($A_{vf}f_y$) desarrollada en la armadura por esta deformación induce una fuerza de sujeción perpendicular, igual y opuesta, la cual a su vez genera una fuerza de fricción ($A_{vf}f_y\mu$) paralela a la fisura para resistir los desplazamientos adicionales.

17.7.1 Aplicaciones

El diseño para corte por fricción se debe aplicar cuando hay transmisión de corte directo a través de un plano dado. Las situaciones en las cuales el diseño para corte por fricción es adecuado incluyen las interfases entre hormigones colocados en distintas épocas, las superficies de contacto entre hormigón y acero, y las uniones de las construcciones de con elementos de hormigón prefabricado. En la Figura 14-2 se ilustran algunas posibles ubicaciones donde se produce transferencia de corte directo y fisuras potenciales donde se puede aplicar el concepto de corte por fricción. El éxito de la aplicación del concepto depende de la adecuada elección de la ubicación del deslizamiento o fisura supuesta. En las aplicaciones típicas la fisura tiende a producirse formando un ángulo de aproximadamente 20 grados respecto de la vertical (ver Ejemplo 14.2).

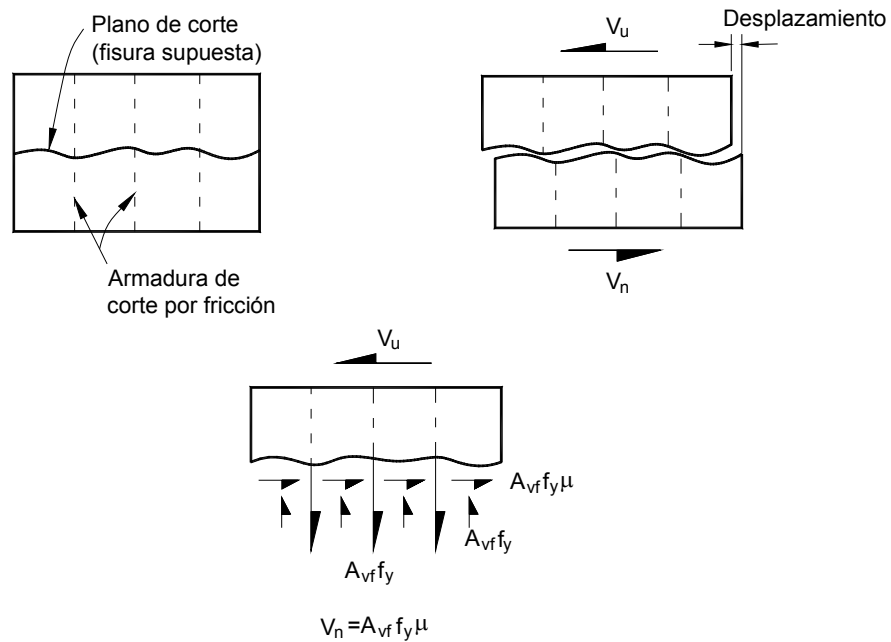


Figura 14-1 – Idealización del concepto de corte por fricción

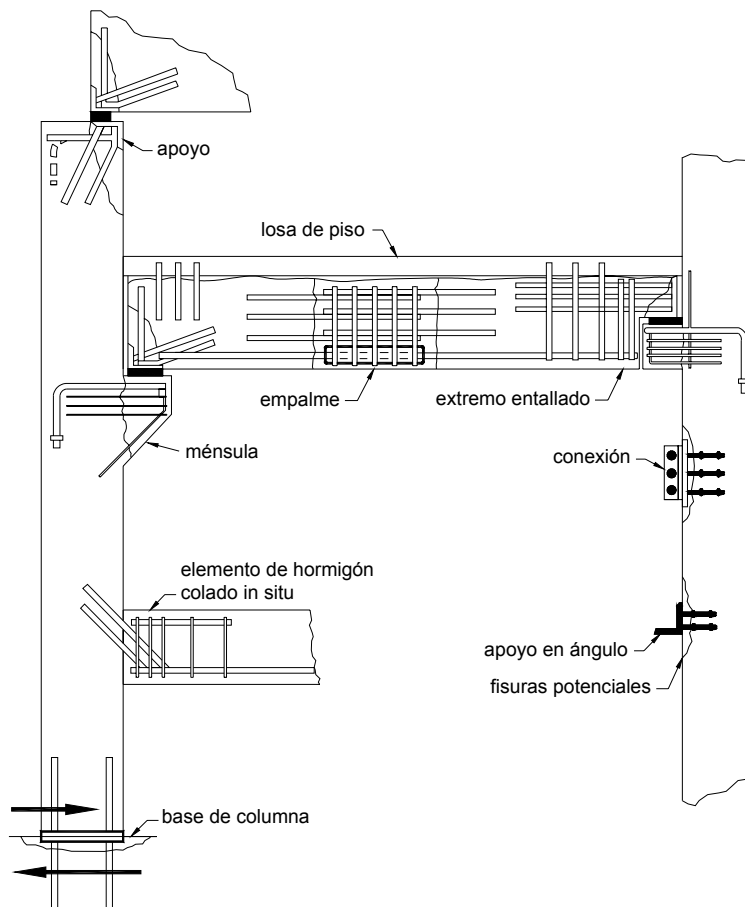


Figura 14-2 – Aplicaciones del concepto de corte por fricción y ubicación de potenciales fisuras

11.7.3 Métodos de diseño para transferencia del esfuerzo de corte

El método de diseño para corte por fricción presentado en el artículo 11.7.4 se basa en el modelo de comportamiento de corte por fricción más sencillo, y permite obtener una estimación conservadora de la resistencia al corte. Otras relaciones de transferencia de corte más precisas permiten obtener estimaciones de la resistencia al corte más exactas. La frase " cualquier otro método de diseño para transferencia del esfuerzo de corte..." incluye los demás métodos comprendidos por el alcance y el espíritu del artículo 11.7. Sin embargo, se debe observar que los requisitos de los artículos 11.7.5 a 11.7.10 se aplican cualquiera sea el método usado para calcular la transferencia del esfuerzo de corte. En la Referencia R11.7.3 se describe uno de los métodos más precisos. En el Ejemplo 15.2 de la Parte 15 se ilustra el "Método de Corte por Fricción Modificado." La edición 1992 del Código introdujo en el artículo 17.5.2.3 una expresión para corte por fricción modificada. Esta expresión se aplica a las interfases entre hormigón prefabricado y hormigón colado en obra.

11.7.4 Método de diseño para corte por fricción

Como en el caso de las demás aplicaciones del diseño al corte, los requisitos del Código para corte por fricción se presentan en términos de la resistencia al corte V_n para su aplicación directa en la expresión básica para la resistencia al corte:

Resistencia al corte requerida \leq Resistencia al corte de diseño

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

Observar que ϕ es igual a 0,75 tanto para corte como para torsión (9.2.3.2). Además, se recomienda utilizar $\phi = 0,75$ para todos los cálculos de dimensionamiento que involucren el corte por fricción, los cuales son controlados predominantemente por el corte. Por ejemplo, el artículo 11.9.3.1 especifica el uso de $\phi = 0,75$ para todos los cálculos de dimensionamiento realizados de acuerdo con 11.9 (ménsulas y cartelas). La resistencia nominal al corte V_n se calcula como:

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

Combinando las Ecuaciones (11-1) y (11-25), para el caso de armadura de corte por fricción perpendicular al plano de corte, la resistencia al corte requerida es:

$$V_u \leq \phi A_{vf} f_y \mu$$

El área necesaria de armadura de corte por fricción, A_{vf} , se puede calcular directamente como:

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu}$$

En la Figura 14-3 se ilustra el caso en el cual la armadura de corte por fricción atraviesa el plano de corte con un ángulo de inclinación, α_f , diferente de 90 grados. La fuerza de tracción $A_{vf} f_y$ es inclinada respecto de la fisura, y se debe descomponer en dos componentes: (1) una componente de sujeción, $A_{vf} f_y \sin \alpha_f$ con una fuerza de fricción asociada $A_{vf} f_y \sin \alpha_f \mu$; y (2) una componente paralela a la fisura que resiste el deslizamiento de forma directa, siendo esta componente igual a $A_{vf} f_y \cos \alpha_f$. Sumando las dos componentes que resisten el deslizamiento, la resistencia nominal al corte se convierte en:

$$\begin{aligned} V_n &= A_{vf} f_y \sin \alpha_f \mu + A_{vf} f_y \cos \alpha_f \\ &= A_{vf} f_y (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f) \end{aligned}$$

Reemplazando en la Ecuación (11-1):

$$V_u \leq \phi [A_{vf} f_y \sin \alpha_f \mu + A_{vf} f_y \cos \alpha_f] \quad \text{Ec. (11-26)}$$

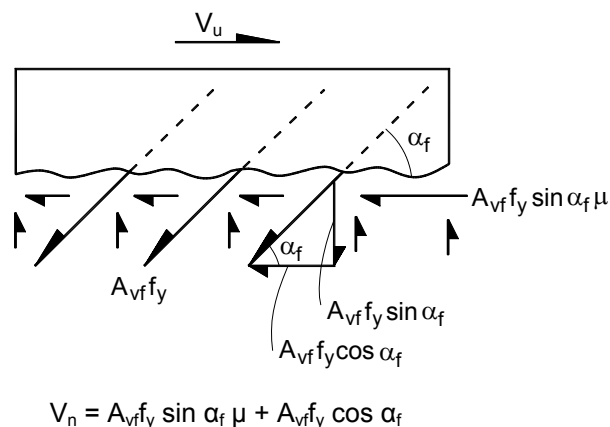


Figura 14-3 – Idealización de la armadura de corte por fricción inclinada

Para el caso de armadura de corte inclinada respecto de la fisura, el área de armadura de corte por fricción necesaria, A_{vf} , se puede calcular directamente a partir de la siguiente expresión:

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f)}$$

Observar que la Ecuación (11-26) se aplica solamente cuando el esfuerzo de corte V_u provoca tracción en la armadura de corte por fricción.

El método de corte por fricción asume que toda la resistencia al corte es proporcionada por la fricción entre las caras de la fisura. La mecánica real de la resistencia al corte directo es más compleja, ya que tanto la acción de pasador como la resistencia cohesiva aparente del hormigón contribuyen a la resistencia al corte directo. Por lo tanto, es necesario utilizar valores artificialmente elevados del coeficiente de fricción μ en las ecuaciones para corte por fricción directo de manera que la resistencia al corte calculada concuerde razonablemente con los resultados obtenidos en ensayos. Usando estos coeficientes elevados se predicen valores conservadores de la resistencia, que constituyen el límite inferior de los datos obtenidos en ensayos, lo cual se puede observar en la Figura 14-4. El método de diseño de corte por fricción modificado indicado en la Referencia R11.7.3 es uno de los diversos métodos más exactos que permiten estimar con mayor precisión la resistencia al corte por fricción.

11.7.4.3 Coeficiente de fricción – Los coeficientes de fricción "efectivos," μ , para las diferentes condiciones de las interfases incluyen un parámetro λ que toma en cuenta la menor resistencia al corte de los hormigones livianos y los hormigones de agregados livianos y arena. Por ejemplo, el valor de μ para hormigón liviano ($\lambda = 0,75$) colocado sobre hormigón endurecido que no se ha hecho intencionalmente rugoso es $0,6 (0,75) = 0,45$. Los coeficientes de fricción a utilizar según las condiciones de las interfases son los siguientes:

Hormigón colocado monolíticamente	$1,4\lambda$
Hormigón colocado sobre hormigón endurecido con la superficie intencionalmente rugosa como se especifica en el artículo 11.7.9	$1,0\lambda$
Hormigón colocado sobre hormigón endurecido cuya superficie no se ha hecho intencionalmente rugosa	$0,6\lambda$
Hormigón anclado a placas o perfiles de acero laminado estructural por medio de pasadores con cabeza o barras de armadura (ver 11.7.10)	$0,7\lambda$

siendo $\lambda = 1,0$ para hormigón de peso normal, $\lambda = 0,85$ para hormigón de agregados livianos y arena y $\lambda = 0,75$ para "hormigón de agregados livianos."

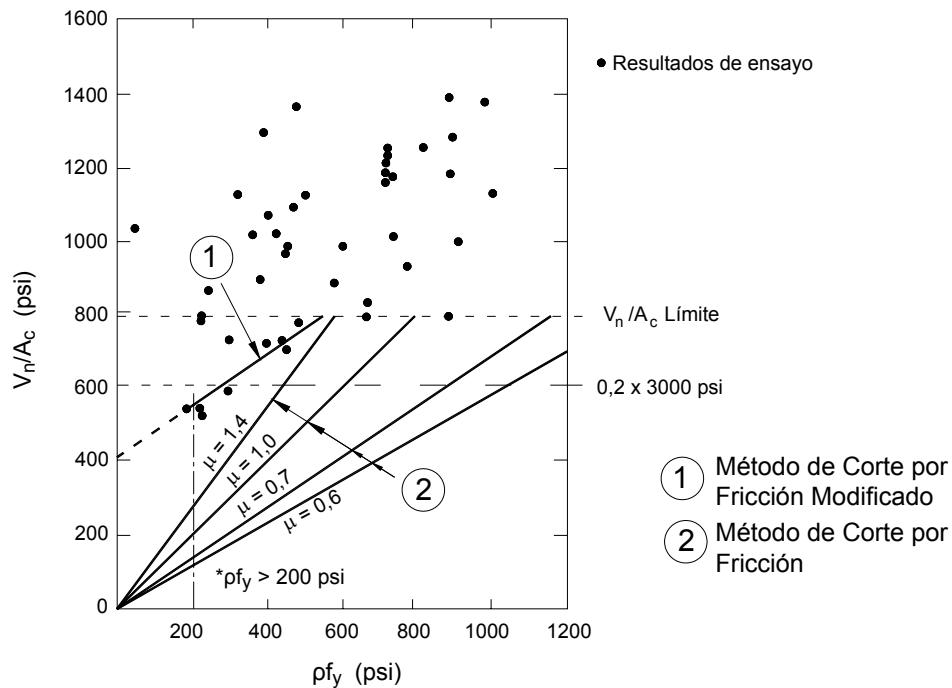


Figura 14-4 – Efecto de la armadura de corte por fricción sobre la transferencia de corte

11.7.5 Máxima resistencia al corte

La resistencia al corte, V_n , no se puede tomar mayor que $0.2f_c$ ni 800 psi por el área de la sección transversal de hormigón que resiste la transferencia de corte. Este límite superior de V_n limita efectivamente la armadura máxima, como se ilustra en la Figura 14-4. Además, para los hormigones livianos, el artículo 11.9.3.2.2 limita la resistencia al corte V_n a lo largo del plano de corte para aplicaciones en las cuales las relaciones entre longitud y la altura, a/d , son bajas, tales como las ménsulas y cartelas. Esta restricción adicional para el hormigón liviano se ilustra en el Ejemplo 14.1.

11.7.7 Fuerzas normales

Las Ecuaciones (11-25) y (11-26) asumen que las únicas fuerzas que actúan sobre el plano de corte son las fuerzas de corte. En las ménsulas, cartelas y otras conexiones casi siempre hay una cierta cantidad de momento debido a la excentricidad de las cargas o los momentos aplicados en las conexiones. Cuando hay momentos actuando en un plano de corte, las tensiones de tracción por flexión y las tensiones de compresión por flexión están en equilibrio. No hay ninguna variación en la compresión resultante $A_v f_y$ que actúa a través del plano de corte, y la resistencia al corte no sufre ningún cambio. Por este motivo no es necesario proveer armadura adicional para resistir las tensiones de tracción por flexión, a menos que la armadura de tracción por flexión requerida sea mayor que la cantidad de armadura de transferencia de corte provista en la zona traccionada por flexión.

Las uniones también pueden soportar una importante cantidad de tracción debido a la restricción del acortamiento térmico y por contracción de los elementos conectados. La fricción de las placas de apoyo, por ejemplo, puede provocar fuerzas de tracción apreciables en una ménsula que soporta un elemento que sufre acortamiento. Por lo tanto, aunque no se requiere de forma generalizada, se recomienda diseñar el elemento para una fuerza de tracción directa mínima de al menos $0.2V_u$, además del corte. Esta fuerza mínima se requiere para el diseño de uniones tales como ménsulas y cartelas (ver 11.9.3.4), a menos que se conozca con precisión la fuerza que realmente actúa. Se debe proveer armadura para tracción directa de acuerdo con el artículo 11.7.7, usando $A_s = N_{uc}/\phi f_y$, siendo N_{uc} la fuerza de tracción mayorada.

Debido a que la tracción directa perpendicular a la fisura supuesta (plano de corte) disminuye la resistencia al corte, es lógico suponer que la compresión aumentará dicha resistencia. El artículo 11.7.7 reconoce este hecho permitiendo sumar una "compresión

neta permanente " a la fuerza de sujeción debida al corte por fricción, $A_v f_y$. Se recomienda, aunque no se exige, el uso de un factor de reducción de 0,9 para la contribución a la resistencia de este tipo de cargas de compresión.

11.7.8 - 11.7.10 Requisitos adicionales

El artículo 11.7.8 establece que la armadura de corte por fricción se debe "colocar adecuadamente" a lo largo del plano de corte. Si no hay ningún momento actuando en el plano de corte, una distribución uniforme de las barras se considera adecuada. Si hay momentos, la armadura se debe distribuir en la zona traccionada por flexión.

La armadura se debe anclar adecuadamente a ambos lados del plano de corte a fin de poder desarrollar la totalidad de la tensión de fluencia de las barras. Debido a que el espacio disponible dentro de los tabiques, ménsulas y cartelas de poco espesor es limitado, con frecuencia es necesario utilizar detalles de anclaje especiales tales como placas soldadas, perfiles o barras transversales. La armadura se debe anclar en hormigón confinado. El confinamiento puede ser provisto por los estribos de vigas o columnas, hormigón "externo," o armadura especialmente dispuesta para tal fin.

En el artículo 11.7.9 el coeficiente de fricción μ se toma igual a 1,0; el hormigón en la interfase se debe hacer intencionalmente rugoso hasta una amplitud total de aproximadamente 1/4 in. Esto se puede lograr estriando el hormigón mientras está en estado plástico o bien modificando las superficies endurecidas con una martellina o cincel.

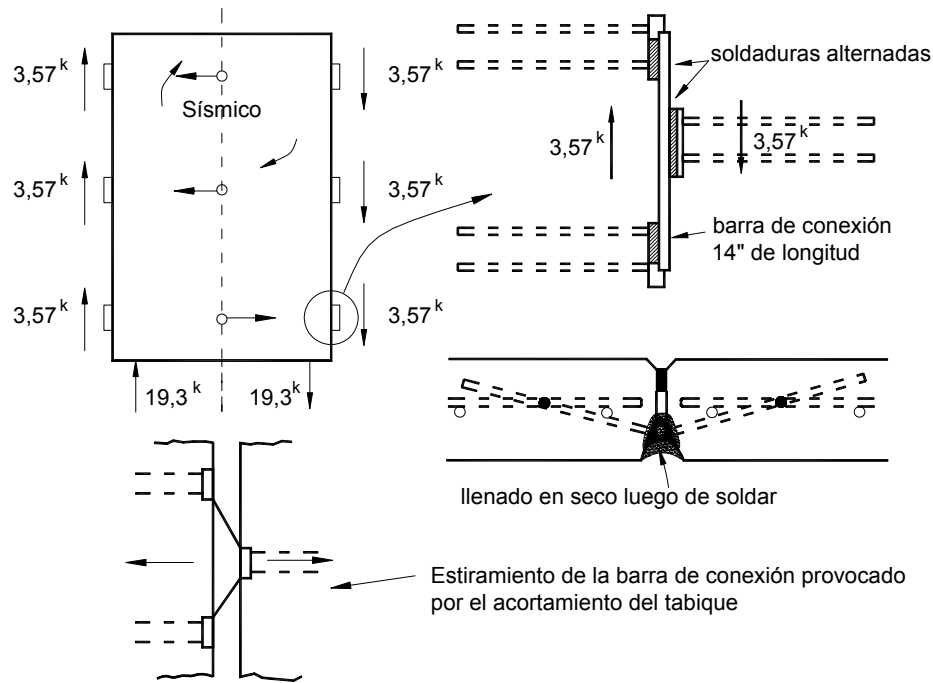
Un requisito final del artículo 11.7.10, el cual a menudo es pasado por alto, es que cuando las interfases son entre acero y hormigón el acero debe estar limpio y libre de pintura. Este requisito se basa en que los ensayos realizados para evaluar el coeficiente de fricción para hormigón anclado a acero estructural por medio de pasadores o barras de armadura ($\mu = 0,7$) corresponden a acero sin pintura. No hay datos disponibles sobre superficies pintadas. Si se han de utilizar superficies pintadas, sería recomendable utilizar un valor de μ inferior.

EJEMPLOS DE DISEÑO

Además de los Ejemplos 14.1 y 14.2 incluidos en las páginas siguientes, también se ilustra el diseño para corte por fricción para el caso de transferencia de corte directo en ménsulas y cartelas (ver Parte 15), el caso de transferencia de corte horizontal entre elementos compuestos (ver Parte 12), y en las uniones columna-zapata (ver Parte 22).

Ejemplo 14.1 – Diseño para corte por fricción

Un panel de tabique está solicitado por las fuerzas sísmicas de corte mayoradas ilustradas a continuación. Diseñar los anclajes para corte suponiendo que se trata de hormigón liviano, $w_c = 95 \text{ lb/ft}^3$, $f'_c = 4000 \text{ psi}$ y $f_y = 60.000 \text{ psi}$



Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Diseñar los anclajes usando el método de corte por fricción.

La placa central es la más cargada. Intentar con una placa de 2 in. \times 4 in. \times 1/4 in.

$$V_u = 3570 \text{ lb}$$

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

$$V_u \leq \phi (A_{vf} f_y \mu) \quad \text{Ec. (11-25)}$$

Para acero sin pintura en contacto con hormigón liviano (95 lb/ft^3):

$$\mu = 0,7\lambda = 0,7 \times 0,75 = 0,525 \quad 11.7.4.3$$

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

$$\text{Resolviendo para } A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu} = \frac{3570}{0,75(60.000)(0,525)} = 0,15 \text{ in.}^2$$

Usar 2 barras No. 3 por placa ($A_{vf} = 0,22 \text{ in.}^2$)

Nota: Las barras se deben soldar a las placas para desarrollar la totalidad de f_y . La longitud de las barras debe ser adecuada para que las barras se desarrollen completamente.

Verificar la máxima resistencia al corte permitida para la conexión. Para hormigón de agregados livianos:

11.9.3.2.2

$$V_{n(\max)} = \left[0,2 - 0,07 \left(\frac{a}{d} \right) \right] f'_c b_w d \quad \text{o bien} \quad \left[800 - 280 \left(\frac{a}{d} \right) \right] b_w d$$

Para las ecuaciones anteriores asumir a = espesor de la placa = 0,25 in. y d = distancia entre el borde de la placa y el centro de la barra unida más alejada = 2,5 in.:

$$\frac{a}{d} \approx \frac{0,25}{2,5} = 0,1$$

Para estas ecuaciones asumir que $b_w d = A_c$ = superficie de contacto de la placa:

$$b_w d = A_c = 2 \times 4 = 8 \text{ in.}^2$$

$$V_{n(\max)} = [0,2 - 0,07(0,1)](4000)(8) = 6176 \text{ lb}$$

$$\text{o bien } V_n = [800 - (280 \times 0,1)](8) = 6176 \text{ lb}$$

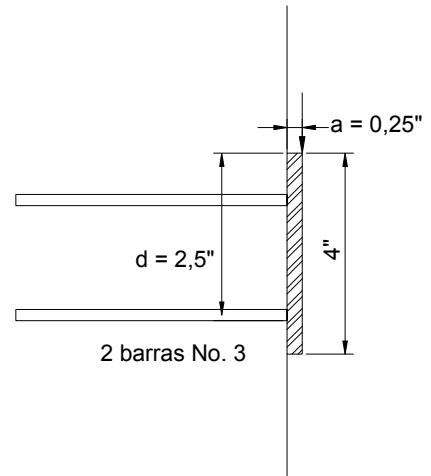
$$\phi V_{n(\max)} = 0,75(6176) = 4632 \text{ lb}$$

$$V_u = 3570 \text{ lb} \leq \phi V_{n(\max)} = 4632 \text{ lb}$$

VERIFICA

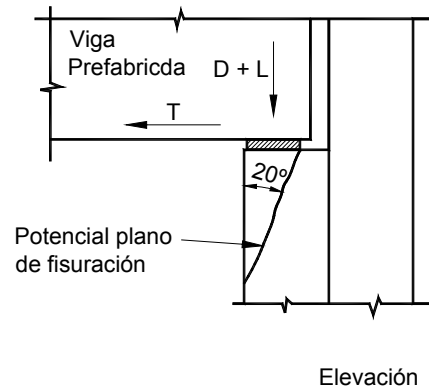
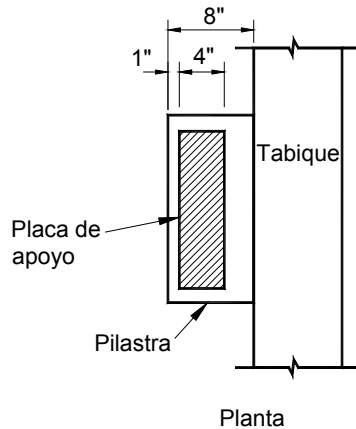
Ec. (11-1)

Usar placas de 2 in. \times 4 in. \times $\frac{1}{4}$ in., con dos barras No. 3



Ejemplo 14.2 – Diseño para corte por fricción (Plano de corte inclinado)

Para la viga apoyada sobre una pilastra como se ilustra a continuación, diseñar para transferencia de corte a través del potencial plano de fisuración. Asumir que se produce una fisura que forma un ángulo de aproximadamente 20 grados respecto de la vertical. Las reacciones de la viga son $D = 25$ kips, $L = 30$ kips. Usar $T = 20$ kips como una estimación de los efectos de la contracción y variación de la temperatura. $f'_c = 3500$ psi; $f_y = 60.000$ psi



Cálculos y discusión

Referencia del Código

1. Cargas mayoradas a considerar:

$$\text{Reacción de la viga: } R_u = 1,2D + 1,6L = 1,2(25) + 1,6(30) = 30 + 48 = 78 \text{ kips}$$

Ec. (9-2)

$$\text{Efectos de la contracción y la temperatura: } T_u = 1,6(20) = 32 \text{ kips} \quad (\text{valor determinante})$$

11.9.3.4

$$\text{pero no menor que } 0,2(R_u) = 0,2(78) = 15,6 \text{ kips}$$

Observar que con T se utiliza el factor correspondiente a sobrecarga 1,6 debido al bajo nivel de certeza en la estimación de los efectos de la contracción y la temperatura bajo cargas de servicio. Además se considera un valor mínimo de 20 por ciento de la reacción de la viga (ver el artículo 11.9.3.4, diseño de ménsulas cortas).

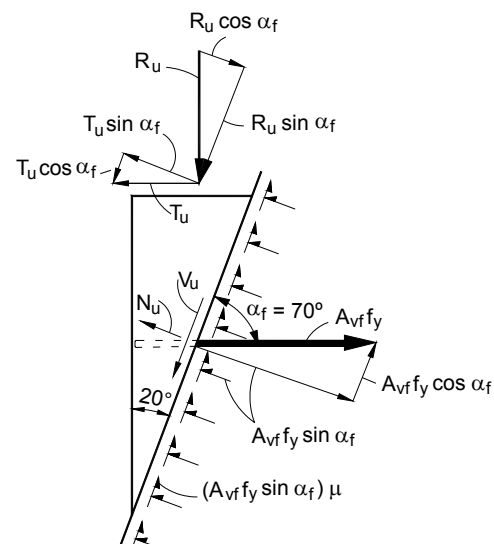
2. Evaluar las fuerzas a lo largo del potencial plano de corte.

Fuerza de corte directo transferida a lo largo del plano de corte:

$$\begin{aligned} V_u &= R_u \sin \alpha_f + T_u \cos \alpha_f = 78(\sin 70^\circ) + 32(\cos 70^\circ) \\ &= 73,3 + 11,0 = 84,3 \text{ kips} \end{aligned}$$

Tracción (o compresión) neta en el plano de corte:

$$\begin{aligned} N_u &= T_u \sin \alpha_f - R_u \cos \alpha_f = 32(\sin 70^\circ) - 78(\cos 70^\circ) \\ &= 30,1 - 26,7 = 3,4 \text{ kips} \quad (\text{tracción neta}) \end{aligned}$$



Aún si las condiciones de carga provocaran compresión neta a través del plano de corte, esta compresión no se podría utilizar para reducir A_{vf} , ya que existe una gran incertidumbre en la determinación de los efectos de la contracción y la temperatura. Además, el artículo 11.7.7 permite reducir A_{vf} sólo en el caso de una compresión neta "permanente."

3. Armadura de corte por fricción para resistir la transferencia de corte directo. Usar μ correspondiente a hormigón colocado monolíticamente.

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f)} \quad \text{Ec. (11-26)}$$

$$\mu = 1,4\lambda = 1,4 \times 1,0 = 1,4$$

11.7.4.3

$$A_{vf} = \frac{84,3}{0,75 \times 60 (1,4 \sin 70^\circ + \cos 70^\circ)} = 1,13 \text{ in.}^2 \quad (\mu \text{ de 11.7.4.3})$$

4. Armadura para resistir la tracción neta.

$$A_n = \frac{N_u}{\phi f_y (\sin \alpha_f)} = \frac{3,4}{0,75 \times 60 (\sin 70^\circ)} = 0,08 \text{ in.}^2$$

Debido a que la falla es controlada fundamentalmente por corte, usar $\phi = 0,75$ (ver 11.9.3.1, diseño de ménsulas cortas).

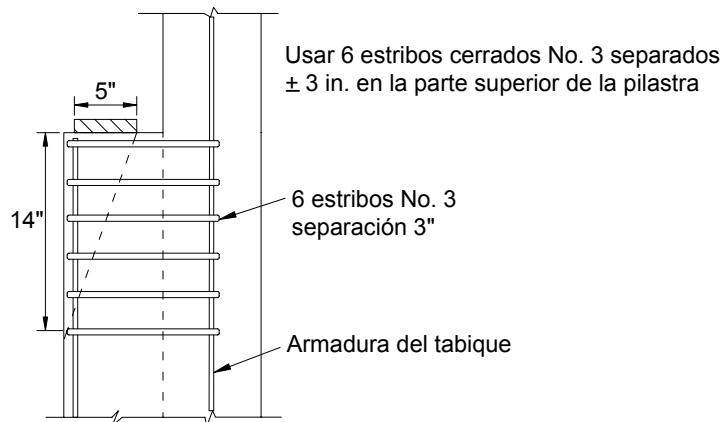
5. Sumar A_{vf} y A_n para obtener el área total de armadura requerida. Distribuir la armadura uniformemente sobre el potencial plano de fisuración.

$$A_s = 1,13 + 0,08 = 1,21 \text{ in.}^2$$

Usar estribos cerrados No. 3 (2 ramas por estribo)

Número requerido = $1,21 / [2 (0,11)] = 5,5$ adoptamos 6,0 estribos.

Los estribos se deben distribuir sobre el potencial plano de fisuración; longitud aproximada = $5/(\tan 20^\circ) \approx 14 \text{ in.}$



6. Verificar la armadura requerida solamente para carga permanente más los efectos de la contracción y la temperatura. Usar un factor de carga de 0,9 para la carga permanente de manera de maximizar la tracción neta a través del plano de corte.

$$R_u = 0,9D = 0,9(25) = 22,5 \text{ kips}, T_u = 32 \text{ kips}$$

$$V_u = 22,5(\sin 70^\circ) + 32(\cos 70^\circ) = 21,1 + 11,0 = 32,1 \text{ kips}$$

$$N_u = 32(\sin 70^\circ) - 22,5(\cos 70^\circ) = 30,1 - 7,7 = 22,4 \text{ kips (tracción neta)}$$

$$A_{vf} = \frac{32,1}{0,75 \times 60(1,4 \sin 70^\circ + \cos 70^\circ)} = 0,43 \text{ in.}^2$$

$$A_n = \frac{22,4}{0,75 \times 60 \times \sin 70^\circ} = 0,53 \text{ in.}^2$$

$$A_s = 0,43 + 0,53 = 0,96 \text{ in.}^2 < 1,21 \text{ in.}^2$$

Por lo tanto, el diseño original para la totalidad de la carga permanente más la sobrecarga es determinante.

7. Verificar la máxima resistencia al corte permitida.

$$V_{n(\max)} = [0,2f'_c A_c] \text{ ó } [800A_c] \quad 11.7.5$$

Tomando el ancho de la pilastra como 16 in.:

$$A_c = \left(\frac{5}{\sin 20^\circ} \right) \times 16 = 234 \text{ in.}^2$$

$$V_{n(\max)} = 0,2(3500)(234)/(1000) = 164 \text{ kips (valor determinante)}$$

$$\text{o bien } V_{n(\max)} = 800(234)/(1000) = 187 \text{ kips}$$

$$\phi V_{n(\max)} = 0,75(164) = 123 \text{ kips}$$

$$V_u = 84,3 \text{ kips} \leq \phi V_{n(\max)} = 123 \text{ kips} \quad \text{VERIFICA} \quad \text{Ec. (11-1)}$$