

CAPITULO III

3. CAPACIDAD RESISTENTE A CORTANTE

3.1. GENERALIDADES

La resistencia de diseño por cortante (ecuación 3.1) es una función de la razón altura a espesor del alma y del espaciamiento de los atiesadotes intermedios que puedan estar presentes. La capacidad por cortante tiene dos componentes: la resistencia antes del pandeo y la resistencia posterior al pandeo.

$$V_R = \phi_V V_n \quad 3.1$$

donde:

$$\phi_V = 0.9$$

“La resistencia posterior al pandeo se basa en la acción del campo de tensión que se forma gracias a la presencia de los atiesadores intermedios. Si los atiesadores no existen o están espaciados a distancias muy grandes, la acción del campo de tensión no será posible y la capacidad por cortante consistirá sólo en la resistencia anterior al pandeo.”³

La resistencia nominal por cortante está dada por las ecuaciones 3.2 y 3.3:

$$\text{Para } \frac{h}{t_w} \leq 187 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} \quad V_n = 0.6A_w F_y \quad 3.2$$

³ William T. Segui, *Diseño de estructuras de acero con LRFD*, Thomson, México.

$$\text{Para } \frac{h}{t_w} > 187 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} \quad V_n = 0.6A_w F_y C_v + 0.6A_w F_y \left(\frac{1 - C_v}{1.15 \sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \quad 3.3$$

La primera de las ecuaciones anteriores se aplica cuando el campo de tensión no está presente y la falla del alma es por fluencia. La segunda ecuación toma en cuenta la acción de campo de tensión, donde el primer término de la ecuación es la resistencia por pandeo por cortante del alma y el segundo término corresponde a la resistencia posterior al pandeo

El factor C_v es la razón del esfuerzo de pandeo crítico del alma al esfuerzo de fluencia cortante del alma y se define con las ecuaciones 3.4 y 3.5:

$$\text{Para } 187 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} \leq \frac{h}{t_w} \leq 234 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} \quad C_v = \frac{187 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}}}{h/t_w} \quad 3.4$$

$$\text{Para } \frac{h}{t_w} > 234 \sqrt{\frac{k_v}{F_y}} \quad C_v = \frac{44000 k_v}{\left(\frac{h}{t_w} \right)^2 F_y} \quad 3.5$$

Un campo de tensión no puede, por lo regular, desarrollarse plenamente en un tablero extremo. Esto puede entenderse al considerar las componentes horizontales de los campos de tensión mostrados en la Figura 3.1.

“El campo de tensión en el tablero CD es equilibrado en el lado izquierdo, en parte, por el campo de tensión en el tablero BC, los tableros interiores son, entonces, anclados por los tableros adyacentes. Sin embargo, el tablero AB no tiene tal anclaje en su lado izquierdo. Aunque el anclaje podría ser proporcionado por un atiesador extremo especialmente diseñado para resistir la flexión inducida por un campo de tensión, esto no se hace de manera usual.

Por consiguiente, el anclaje para el tablero BC debe ser proporcionado en el lado izquierdo por un tablero en cortante de viga y no por el tablero con campo de tensión". (Ref.³). Ver ecuación 3.6.

$$V_n = 0.6A_wF_yC_v \quad 3.6$$

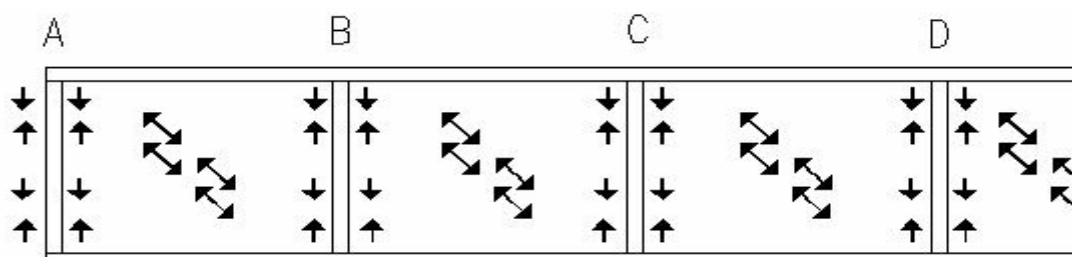


Figura 3.1 Tablero de campo de tensión

“Las almas delgadas requieren de atiesadores transversales para aumentar su resistencia al corte. Los atiesadores por lo común consisten en placas rectangulares soldadas al alma. Los atiesadores transversales se pueden usar en pares, uno a cada lado del alma, o bien colocarlos de un solo lado del alma”. (Ref.²).

En la Figura 3.2 se pueden observar la forma de los atiesadores en traveses armados.

La conexión entre la trabe armada y los atiesadores se hace por medio de soldadura de filete. En la Figura 3.3 se muestra la unión entre el alma y el atiesador.

Los atiesadores de traveses armados se clasifican en dos grupos diferentes: el primero se refiere a los atiesadores de *apoyo*, que tienen como función principal el transmitir fuertes reacciones o cargas concentradas hacia el peralte total del

alma, mientras que el segundo grupo de atiesadores se refiere a los *atiesadores intermedios* cuya diferencia principal radica en que estos se colocan para poder prevenir el pandeo del alma debido a la compresión diagonal.

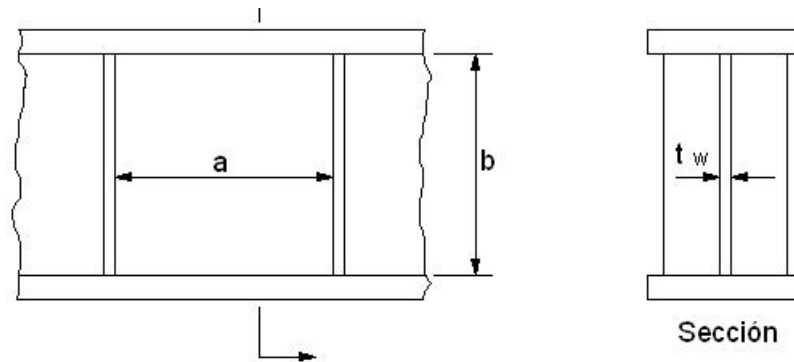


Figura 3.2 Trabe armada con atiesadores.

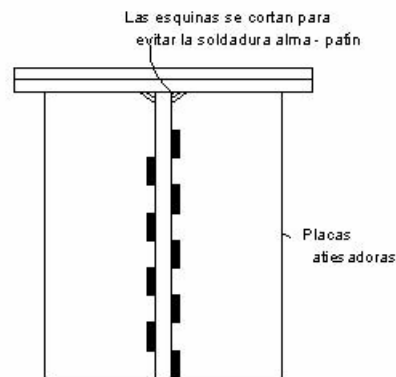


Figura 3.3 Atiesadores de traveses de alma llena soldados

3.2. ATIESADORES DE APOYO

“Los atiesadores de apoyo se requieren cuando el alma tiene una resistencia insuficiente por cualquiera de los estados límites de fluencia del alma, aplastamiento del alma o pandeo lateral del alma”. (Ref. ³).

Los atiesadores de apoyo deben estar íntimamente en contacto con los patines de la trabe que van a ser cargados y deben sobresalir de los cantos de las placas de los patines y los ángulos tanto como sea posible.

Con objeto de obtener un buen apoyo entre el patín y los atiesadores, siempre será conveniente ya sea soldar los atiesadores con los patines o cepillar sus lados proyectantes, ya que debe existir un área de contacto suficiente entre los atiesadores y el patín para transmitir la carga por aplastamiento. Esto se observa en la Figura 3.4:

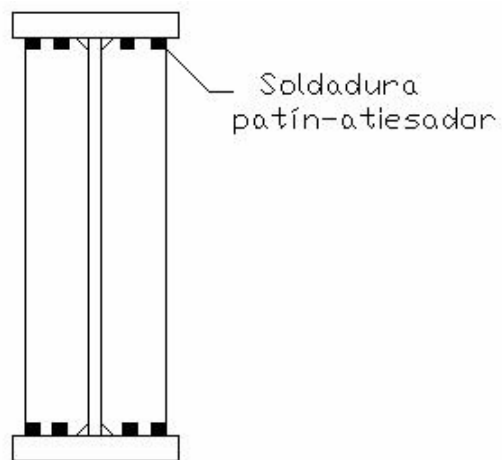


Figura 3.4 Atiesadores por aplastamiento

La capacidad de carga de las almas delgadas sin atiesar es sólo ligeramente mayor a su resistencia de pandeo inicial. Sin embargo, cuando se atiesan estas almas delgadas, su capacidad de carga se incrementa considerablemente.

Los atiesadores tienen un doble propósito: incrementar la carga de pandeo inicial y capacitar al alma para soportar esfuerzos de corte después de su pandeo inicial, debido al efecto llamado "campo de tensión".

La resistencia de diseño del alma viene dado por la ecuación 3.7:

$$R_{alma} = \phi R_n \quad 3.7$$

donde:

$$\phi=1$$

Si la carga está por lo menos a una distancia igual al peralte de la trabe desde el extremo, se obtiene la ecuación 3.8.

$$R_n = (5k + N)F_y t_w \quad 3.8$$

Cuando la carga está a menos de un peralte de distancia del extremo, entonces R_n , estará dada por la ecuación 3.9:

$$R_n = (2.5k + N)F_y t_w \quad 3.9$$

donde:

k : Distancia de la cara exterior del patín a la punta del filete en el alma (para vigas roladas) o a la punta de la soldadura (para traveses soldados)

N : Longitud de apoyo de la carga concentrada, medida en la dirección del eje longitudinal de la trabe (no menor que k para una reacción en el extremo).

Por aplastamiento del alma, el factor de resistencia es 0.75 y cuando la carga está por lo menos a la mitad del peralte de la trabe desde el extremo, se aplica la ecuación 3.10:

$$R_n = 135t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_{yw} t_f}{t_w}} \quad 3.10$$

Cuando la carga está a menos de la mitad del peralte desde el extremo de la trabe, se tienen las ecuaciones 3.11 y la 3.12:

$$R_n = 68t_w^2 \left[1 + 3 \left(\frac{N}{d} \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_{yw} t_f}{t_w}} \quad \text{para } \frac{N}{d} \leq 0.2 \quad 3.11$$

$$R_n = 68t_w^2 \left[1 + \left(4 \frac{N}{d} - 0.2 \right) \left(\frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{F_{yw} t_f}{t_w}} \quad \text{para } \frac{N}{d} > 0.2 \quad 3.12$$

donde:

d : Peralte total de la trabe.

t_f : Espesor del patín de la trabe.

t_w : Espesor del alma.

N : Longitud de apoyo de la carga concentrada, medida en la dirección del eje longitudinal de la trabe.

Los atiesadores de apoyo se requieren para prevenir el pandeo lateral del alma sólo bajo un número limitado de circunstancias. El pandeo lateral del alma debe revisarse cuando el patín de compresión no está restringido contra el movimiento relativo con respecto al patín de tensión. La resistencia de diseño tendrá un factor de resistencia de 0.85.

Si el patín está restringido contra la rotación se tiene la ecuación 3.13.

$$R_n = \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2} \left[1 + .4 \left(\frac{h/t_w}{\ell/b_f} \right)^3 \right] \quad 3.13$$

Si el patín no está restringido contra la rotación, entonces se usa la ecuación 3.14.

$$R_n = \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2} \left[.4 \left(\frac{h/t_w}{\ell/b_f} \right)^3 \right] \quad 3.14$$

siendo:

$C_r = 960,000$ cuando $M_u < M_y$.

$C_r = 480,000$ si no es así.

ℓ : Máxima longitud no soportada del patín.

b_f : Ancho del patín.

Aunque el alma puede ser dimensionada para resistir directamente cualquier carga concentrada aplicada, por lo general se provee a la trabe de los atiesadores de apoyo. Si se emplean atiesadores en cada carga concentrada, no tienen que revisarse los estados límite de fluencia del alma, aplastamiento del alma y pandeo lateral del alma.

El AISC requiere que se utilicen atiesadores de apoyo de altura total en pares y se analicen como columnas axialmente cargadas, sometidos a las siguientes directrices:

1. La sección transversal del miembro axialmente cargado consiste en las placas del atiesador y una longitud del alma simétricamente situada como se muestra en Figura 3.5. Esta longitud no debe ser mayor que 12 veces el espesor del alma para un atiesador de extremo o que 25 veces el espesor del alma para un atiesador interior.
2. La longitud efectiva debe igualarse a 0.75 veces la longitud real, como se muestra en la ecuación 3.15.

$$Kl = 0.75h$$

3.15

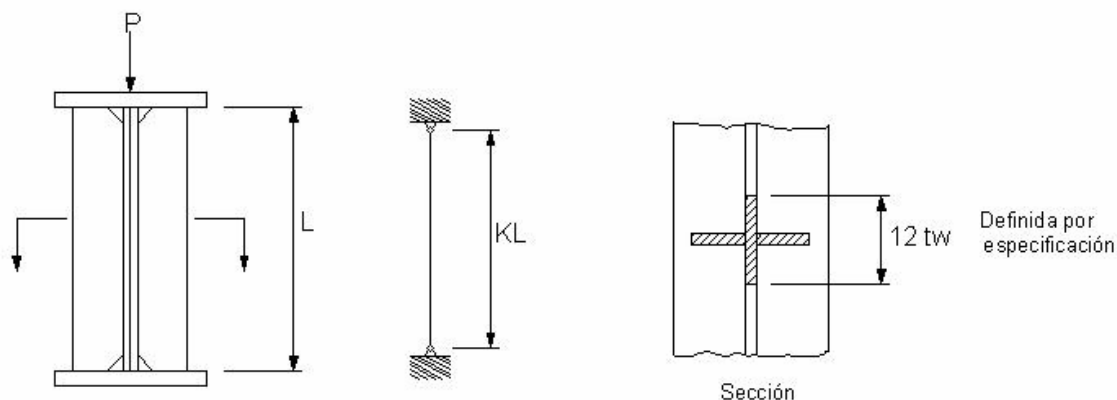


Figura 3.5 Sección transversal de la trabe armada.

El AISC, en la sección K1.9, da también los siguientes criterios adicionales para los atiesadores de apoyo:

La razón ancho a espesor debe satisfacer la ecuación 3.16.

$$\frac{b}{t} \leq \frac{95}{\sqrt{F_y}} \quad 3.16$$

La soldadura que conecta el atiesador al alma debe tener la capacidad de transmitir la fuerza cortante desbalanceada. Conservadoramente, la soldadura puede diseñarse para tomar la fuerza concentrada en su totalidad.

3.3. ATIESADORES INTERMEDIOS

“Cuando el esfuerzo cortante en el alma se mantiene con un valor muy bajo, los atiesadores intermedios, si se requieren, sólo sirven para mejorar la resistencia al pandeo de la placa del alma y no tiene lugar la acción de campo de tensión. Para un esfuerzo cortante muy alto, la resistencia al cortante es la suma

de la resistencia de la placa del alma pandeada y la componente vertical de la tensión diagonal que se induce en el alma pandeada. En este caso, los atiesadores intermedios cumplen la doble función de mejorar la resistencia al pandeo y de actuar como puntales en compresión como una armadura.”⁴

Los atiesadores intermedios pueden usarse en pares o como atiesadores sencillos, a un solo lado del alma y también pueden ser llamados atiesadores simples o atiesadores estabilizadores. Por lo general, la función de dichos atiesadores es la de proporcionar rigidez lateral.

Las pruebas han demostrado que si la relación del espesor del alma a su altura no atiesada es menor que aproximadamente $\frac{1}{70}$, es posible el pandeo diagonal debido a compresión, y se requieren atiesadores intermedios. La efectividad de los atiesadores podría aumentar siempre y cuando se haga uso de perfiles rígidos que aseguren una mayor fuerza o restricción en contra de la rotación de los bordes de los tableros.

Para asegurarse que los atiesadores puedan proporcionar la rigidez adecuada y que cada tablero pueda considerarse que está actuando independientemente de los otros existentes en la trabe, se han implantado reglas y propuestas que han surgido con base en infinidad de experimentos.

Como se ha mencionado anteriormente, los atiesadores sirven para incrementar efectivamente la resistencia del alma al pandeo por cortante.

⁴ Bruce G. Johnston, *Diseño Básico de Estructuras de Acero*, Prentice-Hall Hispanoamericana, México.

Contrariamente a lo que la mayoría de nosotros pensamos, la obtención de la carga aplicada a los atiesadores es bastante sencilla. Se considera usualmente que de ningún modo están sujetos a cargas, lo que permite que los ángulos atiesadores se puedan doblar como se muestra en la Figura 3.6.

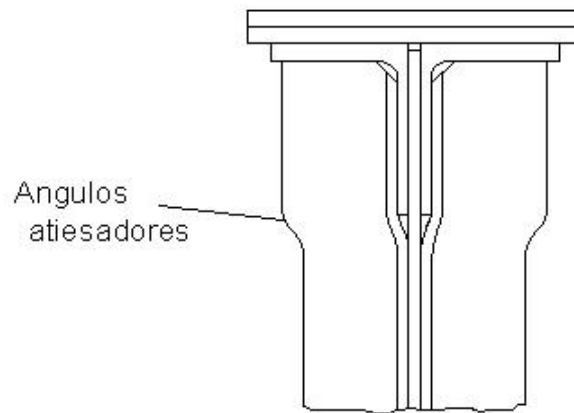


Figura 3.6 Atiesador intermedio.

El espaciamiento que debe existir entre atiesadores intermedios también es regido por las especificaciones del AISC, la cual nos indica que los atiesadores intermedios pueden espaciarse a intervalos que no excedan al menor de las siguientes longitudes:

1. La altura no atiesada del alma (un arrugamiento o pandeo no puede ocurrir a lo largo de una línea de 45° de la parte superior a la inferior de la trabe sin encontrar un atiesador).
2. El valor dado por la ecuación 3.17, en donde f_u es el esfuerzo de corte unitario promedio en la sección total del alma, en la sección considerada, y t es el espesor del alma.

$$d = \frac{11,000}{\sqrt{f_u}} t \quad 3.17$$

Los primeros dos espacios en los extremos simplemente apoyados de trabes armadas tendrán una y media veces los valores determinados con los requisitos anteriores.

El área mínima de la sección transversal de un solo atiesador o de un par de ellos, está dada por la ecuación 3.18:

$$A_{st} = \frac{F_{yw}}{F_{yst}} \left[0.15 D h t_w (1 - C_v) \frac{V_u}{\phi_v V_n} - 18 t_w^2 \right] \geq 0 \quad 3.18$$

donde:

A_{st} : Área transversal total del atiesador requerido cuando se usa la acción del campo de tensión.

F_{yst} : Esfuerzo de fluencia del atiesador.

D : Función de la configuración del atiesador

$D = 1.0$ para atiesadores en pares (ángulos o placas)

$D = 1.8$ para atiesadores de un solo ángulo

$D = 2.4$ para atiesadores de una sola placa

El área especificada por la ecuación anterior es necesaria para resistir la componente vertical de la compresión diagonal en el tablero. Las especificaciones del AISC proporcionan también las áreas requeridas para el atiesador, expresadas como un porcentaje del área del alma para varios valores de $\frac{a}{h}$ y $\frac{h}{t_w}$.

“La limitación del momento de inercia tiene por objeto evitar el pandeo local del alma entre los tableros atiesados. El requerimiento de área es con el propósito

adicional de proporcionar una capacidad de puntal en compresión adecuada durante la acción de campo de tensión". (Ref. ⁴).

El momento de inercia mínimo del atiesador con respecto a un eje en el plano del alma o respecto a la cara del atiesador en contacto con el alma, cuando se trata de un solo atiesador, está dado por la ecuación 3.19:

$$I_{st} = at_w^3 j \tag{3.19}$$

siendo:

$$j = \frac{2.5}{\left(\frac{a}{h}\right)^2} - 2 \geq 0.5 \tag{3.20}$$

Es importante saber que los atiesadores intermedios no se diseñan como miembros en compresión; sin embargo, una limitación de la relación ancho a espesor se usa como guía para evitar el pandeo local al proporcionar la sección transversal del atiesador.

El límite de la razón ancho a espesor para pares de lados proyectantes de ángulos en contacto continuo se empleará aquí, dado por la ecuación 3.16:

$$\frac{b}{t} = \frac{95}{\sqrt{F_y}} \tag{3.16}$$

A menos que ellos sirvan también como los atiesadores de apoyo, no se requiere que los atiesadores intermedios se apoyen contra el patín de tensión, por lo que su longitud puede ser algo menor que la altura h del alma y así se evitan los problemas de fabricación asociados con un ajuste estrecho.

De acuerdo con las especificaciones del AISC, la longitud debe estar entre los límites establecidos por la distancia entre las soldaduras que conectan el

atiesador al alma y la soldadura que conecta el alma al patín de tensión. Esta distancia, designada como “*c*”, se muestra de mejor manera en la Figura 3.7.

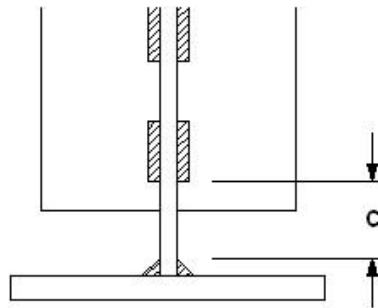


Figura 3.7 Distancia *c* de atiesadores.

Esta distancia, designada “*c*” en la figura anterior, debe estar comprendida entre cuatro y seis veces el espesor del alma.

Para la obtención del flujo de cortante se utilizará la ecuación 3.21.

$$f = 0.045h\sqrt{\frac{F_y^3}{E}} \quad [kips/in] \quad 3.21$$

La soldadura de filete intermitente mínima será probablemente la más adecuada. La única directriz del AISC está en el Apéndice F2.3, la cual requiere que la distancia libre entre las soldaduras de filete intermitentes no sea mayor de $16 t_w$ ó 10 pulgadas.

Un resumen del procedimiento anterior se indica en el siguiente diagrama de flujo.

3.4. DIAGRAMA DE FLUJO

