

# Apéndice C

---

## El método de diseño del puntal y el tirante (online)

### C.1 INTRODUCCIÓN

Este apéndice presenta un método alternativo para el diseño de miembros de concreto reforzado con discontinuidades geométricas y de fuerzas. El método es también muy útil para el diseño de vigas de gran peralte para las cuales la hipótesis habitual de distribución lineal de deformaciones unitarias no es válida. Este método de diseño, comúnmente conocido como el diseño del puntal y el tirante, se introduce brevemente. El método Puntal y tirante estaba en el Apéndice A del ACI 318-11. Ha sido movido al Capítulo 23 del Código ACI 318-14.

### C.2 VIGAS DE GRAN PERALTE

La sección 9.9.1 del código del ACI define a una viga de gran peralte como un miembro que

- a) Está cargada en una cara y está sustentada en la cara opuesta de modo que pueden desarrollarse puntales de compresión entre la carga y los apoyos.
- b) Tiene un claro libre no mayor que cuatro veces su peralte total o tiene una región donde se localizan cargas concentradas a menos del doble del peralte del miembro desde el apoyo.

Las *trabes de transferencia* son un tipo de viga de gran peralte que se presentan con cierta frecuencia. Estos miembros se usan para transferir cargas en sentido lateral desde una o más columnas a otras columnas. Algunas veces los muros de carga también se comportan como vigas de gran peralte.

Las vigas de gran peralte comienzan a agrietarse para cargas que varían de  $\frac{1}{3}$  a  $\frac{1}{2}P_u$ . Como resultado, los análisis elásticos no tienen mucho valor para nosotros, excepto en un aspecto: las grietas nos dicen algo acerca de la manera en que están distribuidos los esfuerzos que causan las grietas. En otras palabras, suministran información en cuanto a cómo se cargan las cargas después del agrietamiento.

### C.3 CLARO DE CORTANTE Y REGIONES DE COMPORTAMIENTO

La relación del claro de cortante de una viga entre su peralte efectivo determina cómo fallará la viga cuando esté sobrecargada. El claro de cortante de una viga específica se muestra en la figura C.1, donde se representa con el símbolo  $a$ . Ésta es la distancia de la carga concentrada mostrada a la cara del apoyo. Si la viga sustenta sólo una carga uniforme, el claro de cortante es el claro libre de la viga.

Cuando los claros de cortante son largos, se les denomina regiones B. Éstas son las regiones para las cuales es aplicable la teoría acostumbrada de vigas —las secciones planas permanecen planas antes y después de la flexión—. La letra B significa ya sea viga o Bernoulli (él presentó la teoría lineal de las deformaciones unitarias para las vigas).

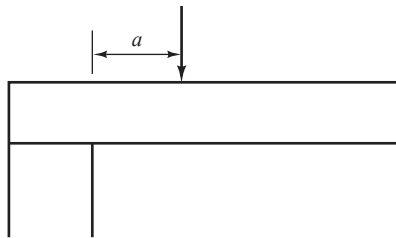


Figura C.1 Claro de cortante.

En algunas situaciones la teoría acostumbrada de vigas no es aplicable. Si los claros de cortante son cortos, las cargas son resistidas principalmente por la acción de arco en vez de la acción de viga. Las localidades donde esto ocurre se llaman regiones D. La letra D representa discontinuidad o perturbación. En estas regiones las secciones planas antes de la flexión no permanecen planas después de la flexión, y las fuerzas obtenidas con los diagramas acostumbrados de cortante y de momento y la teoría de vigas de primer orden son incorrectas.

Las regiones D son aquellas partes de los miembros localizadas cerca de las cargas concentradas y las reacciones. También incluyen nudos y cartelas y otros sitios donde se presentan cambios repentinos en la sección transversal del miembro tales como los orificios que están presentes en los miembros.

De acuerdo con el principio de St. Venant, las perturbaciones locales tales como aquellas causadas por las cargas concentradas tienden a disiparse en una distancia aproximadamente igual al peralte del miembro. La figura C.2 muestra varias regiones típicas B y D. Usted debe observar que los autores usaron el principio de St. Venant en esta figura para mostrar el alcance de las regiones D. Para más ejemplos el lector debe examinar también las figuras. R.23.1.1 y R.23.1.2 en el apéndice A del código del ACI.

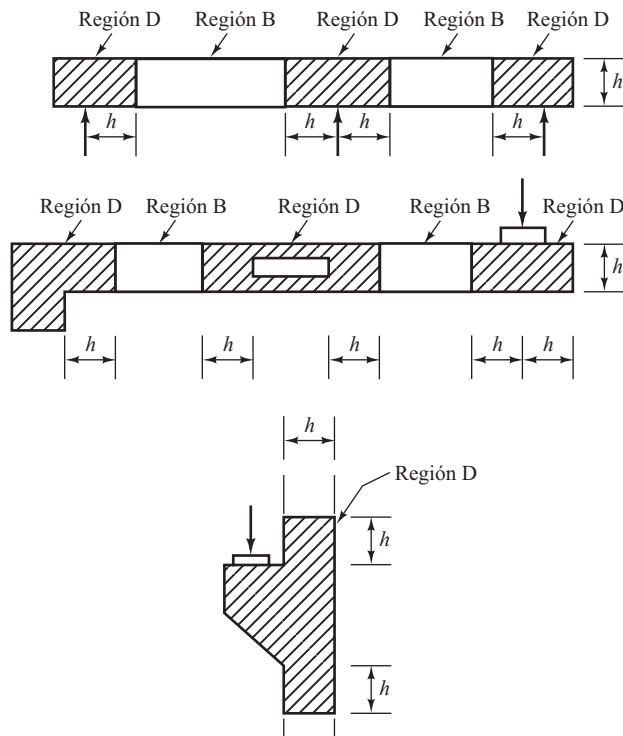


Figura C.2 Regiones B y D.

## C.4 LA ANALOGÍA DE LA ARMADURA

Si los claros de cortante son muy cortos, tienden a desarrollarse grietas inclinadas que se extienden de las cargas concentradas a los apoyos. Esta situación se ilustra en la figura C.3. En efecto, el flujo de cortante horizontal desde el refuerzo longitudinal a la zona de compresión ha sido interrumpido. Como resultado, el comportamiento del miembro ha cambiado del de una viga al de un arco atirantado, donde las varillas de refuerzo actúan como los tirantes de un arco.

En la sección 8.7 de este libro, se hizo referencia a la descripción de las vigas de concreto reforzado de Ritter-Morsch con el método de la analogía de la armadura. De acuerdo con esa teoría, una viga de concreto reforzado con refuerzo para cortante se comporta bastante como una armadura de cuerdas paralelas estáticamente determinada de nodos con pasadores. Se considera que el bloque de compresión del concreto es la cuerda superior de la “armadura” ficticia, mientras que se considera que el refuerzo en tensión actúa como la cuerda inferior. Se dice que el alma de la “armadura” consiste en los estribos que actúan como miembros en tensión vertical, mientras que se supone que las partes del concreto entre las grietas diagonales actúan como miembros a compresión diagonal. Este tipo de “armadura” se muestra en la figura C.4, la cual es una copia de la figura 8.4 presentada anteriormente en este libro.

En esta figura, el concreto a compresión y los estribos se muestran con líneas punteadas. Estas líneas representan los centros estimados de gravedad de esas fuerzas. Por otro lado, las fuerzas de tensión se representan con líneas continuas debido a que esas fuerzas actúan claramente a lo largo de las líneas de las varillas de refuerzo.

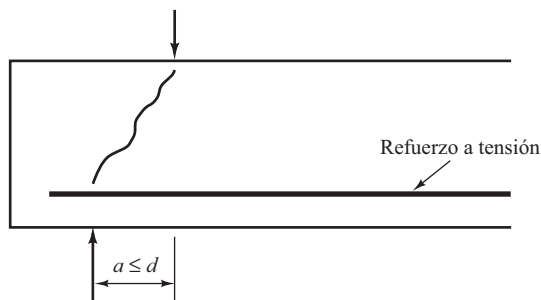


Figura C.3 Un claro de cortante muy corto.

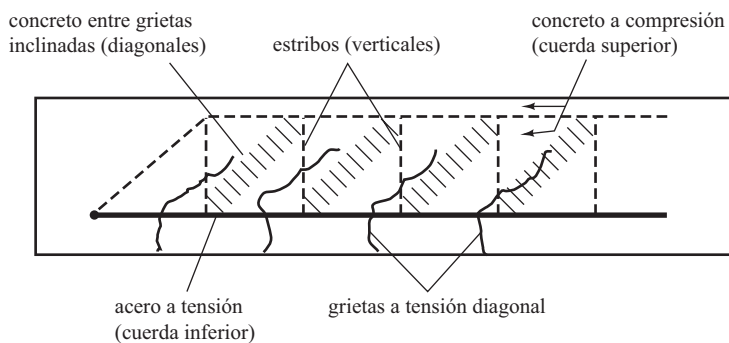


Figura C.4 Analogía de la armadura.

## C.5 DEFINICIONES

Un *modelo de puntal y tirante* es un modelo de armadura de una región D donde, el miembro se representa mediante una armadura idealizada de puntales y tirantes.

Un *tirante* es un miembro a tensión en un modelo de puntal y tirante.

Un *puntal* es un miembro a compresión en un modelo de puntal y tirante que representa la resultante del campo a compresión.

Un *nodo* en un modelo de puntal y tirante es el punto donde los puntales, los tirantes y las fuerzas concentradas se intersecan en el nodo.

La *zona nodal* es el volumen de concreto alrededor de un nodo que se supone que transfiere las fuerzas desde los puntales y los tirantes a través del nodo.

## C.6 REQUISITOS DEL CÓDIGO DEL ACI PARA EL DISEÑO DE PUNTAL Y TIRANTE

Varios de los más importantes requisitos del código para el diseño de puntal y tirante son los siguientes.

### Resistencia de los puntales

1. La resistencia de diseño de un puntal, un tirante o una zona nodal,  $\phi F_n$ , debe ser cuando menos tan grande como la fuerza en el puntal o el tirante o la zona nodal (código ACI, sección 23.3.1).

$$(a) \text{ Puntales } \phi F_{ns} \geq F_{us} \quad (\text{ACI Ecuación 23.3.1a})$$

$$(b) \text{ Tirantes } \phi F_{nt} \geq F_{ut} \quad (\text{ACI Ecuación 23.3.1b})$$

$$(c) \text{ Zonas nodales } \phi F_{nm} \geq F_{un} \quad (\text{ACI Ecuación 23.3.1c})$$

En la sección 21.2.1 del código del ACI,  $\phi$  se especifica como 0.75 para los miembros de los puntales y los tirantes.

2. La resistencia nominal a compresión de un puntal que no contiene refuerzo longitudinal debe tomarse como el menor valor en los dos extremos del puntal de los siguientes

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} \quad (\text{Ecuación 23.4.1a, ACI})$$

donde  $A_{cs}$  es el área de la sección transversal en un extremo de un puntal tomada perpendicular al eje y  $f_{ce}$  es la resistencia a compresión efectiva del concreto (lb/plg<sup>2</sup>) en un puntal o una zona nodal. Su valor debe tomarse como el menor de (a) y (b) como sigue:

- a) Resistencia a compresión efectiva del concreto en los puntales

$$f_{ce} = 0.85 \beta_s f'_c \quad (\text{Ecuación 23.4.3, ACI})$$

$\beta_s$  es un factor que se usa para estimar el efecto del agrietamiento y el confinamiento del refuerzo sobre la resistencia del concreto de los puntales. Los valores de  $\beta_s$  se dan en la tabla 23.4.3 del apéndice del código del ACI para diferentes situaciones. Varían de 0.4 a 0.75, y su significado y efecto son similares a  $\beta_1$  en los bloques rectangulares de esfuerzo que se estudiaron con mucha frecuencia para vigas y columnas anteriormente en este libro. Para un puntal que tenga un área transversal uniforme en toda su longitud,  $\beta_s = 1.0$ . Para los puntales en elementos de tensión o las zonas de tensión de los miembros,  $\beta_s = 0.40$ .

Para los puntales con forma de botella (el ancho de la sección media mayor que el ancho en los nodos),  $\beta_s = 0.75$  si  $f'_c \leq 6000$  y si el eje del puntal está cruzado por capas de refuerzo que satisfagan la ecuación 23.5.3 del ACI

$$\sum \frac{A_{si}}{B_s S_i} \sin \alpha_i \geq 0.003 \quad (\text{Ecuación 23.5.3, ACI})$$

donde  $A_{si}$  es el área total del refuerzo superficial con una separación  $s_i$  en la capa iésima del refuerzo, cruzando el puntal formando un ángulo  $\alpha_i$  con el eje del puntal. Para los puntales con forma de botella que no satisfagan las condiciones de la ecuación 243.5.3 del ACI,  $\beta_s = 0.60\lambda$ . Finalmente, para todos los demás puntales,  $\beta_s = 0.60\lambda$ .

Si el puntal tiene refuerzo longitudinal,

$$F_{ns} \geq f_{ce}A_{cs} + A'_s f'_s \quad (\text{Ecuación 23.4.1b, ACI})$$

$F_{ns}$  se evalúa para cada extremo del puntal y se toma el menor valor.  $A'_s$  es área del refuerzo de compresión a lo largo de la longitud del puntal, y  $f'_s$  es el esfuerzo calculado en el refuerzo de compresión para la resistencia axial nominal del puntal. En el caso del refuerzo de grado 40 o 60,  $f'_s$  puede tomarse igual a  $f_y$ .

### Resistencia de las zonas nodales

La resistencia nominal a la compresión de una zona nodal,  $F_{nn}$ , es

$$F_{nn} = f_{ce}A_{nz} \quad (\text{Ecuación 23.9.1, ACI})$$

donde  $A_{nz}$  es el menor de

- el área de la cara de la zona nodal sobre la que actúa  $F_u$ , tomada perpendicular a la línea de acción de  $F_{us}$  o
- el área de la sección transversal de la zona nodal, tomada perpendicular a la línea de acción de la fuerza resultante en la sección.

La fuerza efectiva de compresión del concreto en la cara de una zona nodal es:

$$f_{ce} = .85\beta_n A_{nz} f'_c \quad (\text{Ecuación 23.9.2, ACI})$$

donde  $\beta_n$  es un factor utilizado para estimar el efecto del anclaje de lazos sobre la compresión efectiva fuerza de la zona nodal. Los valores se especifican para diferentes situaciones en ACI, Tabla 23.9.2, y varían de 0,6 a 1,0, dependiendo del número de lazos y en qué límites la zona nodal se encuentren.

### Resistencia de los tirantes

Siguiendo las disposiciones del ACI 318 sección 23.7, la resistencia nominal de un tirante debe determinarse con la siguiente expresión:

$$F_{nt} = A_{ts}f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (\text{Ecuación 23.7.2, ACI})$$

donde

$A_{ts}$  = área del refuerzo sin presfuerzo en un tirante

$f_y$  = resistencia a la fluencia del refuerzo sin presfuerzo

$A_{tp}$  = área del acero presforzado en un tirante

$f_{se}$  = esfuerzo efectivo en el refuerzo presforzado después de las pérdidas

$\Delta f_p$  = incremento en el esfuerzo en el acero presforzado debido a cargas factorizadas. El código en su sección 23.7.3 establece que es permisible usar  $\Delta f_p = 60\,000 \text{ lb/plg}^2$  para refuerzo presforzado adherido y  $10\,000 \text{ lb/plg}^2$  para refuerzo presforzado sin adherencia. Pueden usarse otros valores si se pueden justificar por análisis.

$$f_{se} + \Delta f_p \text{ no excederá } f_{py}.$$

## C.7 SELECCIÓN DE UN MODELO DE ARMADURA

Cuando se usa el método de puntal y tirante para las regiones D, se piensa que los resultados son más conservadores pero más realistas que los resultados obtenidos con la teoría acostumbrada de vigas. Para diseñar para una región D de una viga, es necesario aislar la región como un cuerpo libre, determinar las fuerzas que actúan en ese cuerpo, y luego seleccionar un sistema o modelo de armadura para transferir las fuerzas por la región.

Una vez que se ha identificado la región D y sus dimensiones se han determinado, se supone que se extiende una distancia  $h$  a cada lado de la discontinuidad, o hasta la cara del apoyo si ese valor es menor que el peralte.

Los esfuerzos en las fronteras de la región se calculan con la expresión acostumbrada para carga axial y flexión combinados,  $P/A \pm Mc/I$ . Los valores resultantes deben dividirse entre el factor de reducción de capacidad  $\phi$  para las fuerzas cortantes (0.75) para obtener los esfuerzos nominales requeridos.

El proyectista necesita representar las regiones D de los miembros, que fallan en cortante, con algún tipo de modelo antes de comenzar el diseño. El modelo seleccionado para vigas con refuerzo para cortante es el modelo de la armadura, ya que es el mejor de todos disponible en este momento.

Para este análisis, se considera la viga de la figura C.5. Se muestran las fuerzas internas y externas que actúan en esta viga, que se supone que está agrietada. Para seleccionar un modelo de puntal y tirante para una viga de este tipo, todos los estribos cortados por la sección imaginaria (véase la figura C.5) se agrupan en uno solo. De una manera similar, el concreto paralelo a una diagonal también se concentra en un solo miembro.

Con el método de puntal y tirante, las fuerzas son resistidas por una armadura interna idealizada tal como la triangular esbozada en la figura C.6. El miembro y los nudos de esta armadura están diseñados de modo que tengan capacidad para resistir las fuerzas calculadas. Por supuesto, la armadura seleccionada debe ser más pequeña que la viga que la encierra, y debe darse a todo el acero de refuerzo el recubrimiento adecuado. Para una primera ilustración, en la figura C.6 se muestra una viga corta de gran peralte que carga sustentada una carga concentrada.

En la figura C.7 se muestran diversos tipos de nudos. Debe observar que tiene que haber cuando menos tres fuerzas en cada nudo por equilibrio. Éste es el número de fuerzas necesarias para el equilibrio estático así como el mayor número que puede presentarse en un estado de equilibrio estático determinado.

Si más de tres fuerzas concurren en un solo nudo cuando se esboza una armadura, el proyectista necesitará hacer combinaciones de ellas de alguna manera de modo que solamente se consideren tres fuerzas que concurren en el nudo. En la figura C.8 se muestran dos modelos posibles de puntal y tirante para una viga de gran peralte que sustentada dos cargas concentradas. En la parte *a*) de la figura, cuatro fuerzas concurren en la posición de cada carga concentrada. Como tales, no podemos determinar todas las fuerzas. En la parte *b*) de la figura se muestra una armadura alternativa, en la cual sólo concurren tres fuerzas en cada nudo.

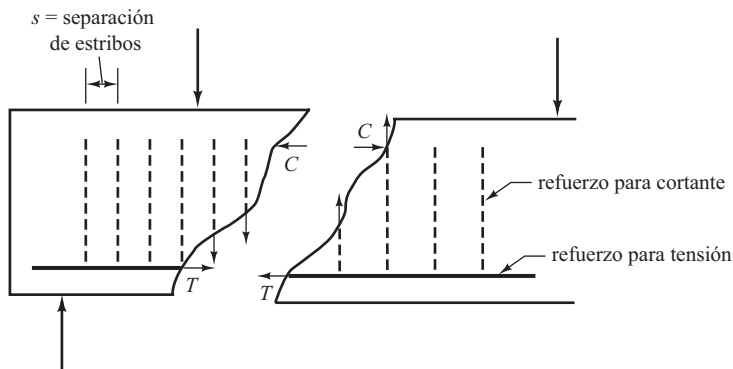
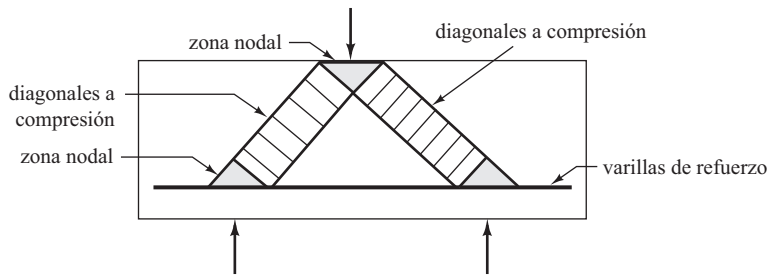
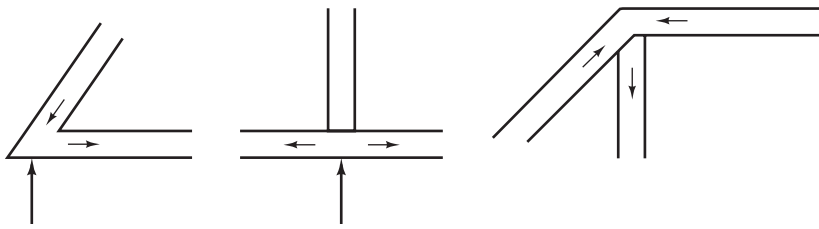


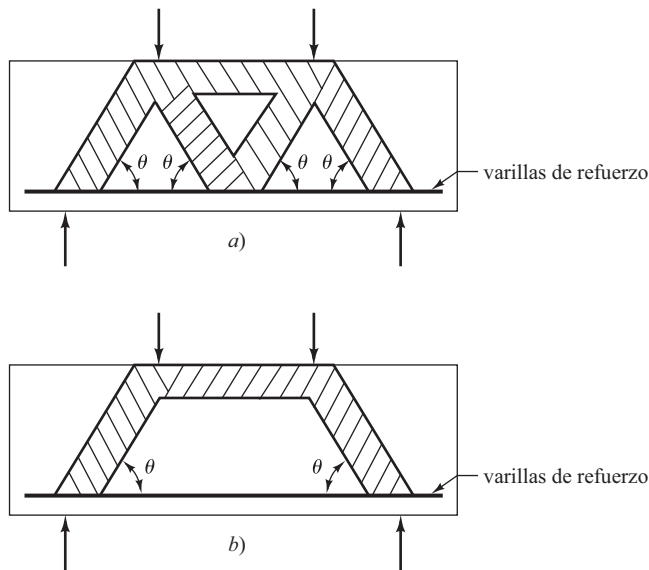
Figura C.5 Una viga que muestra el refuerzo para cortante y para tensión.



**Figura C.6** Una viga cortada de gran peralte con el modelo de armadura mostrado.



**Figura C.7** Diferentes tipos de nodos de armadura.



**Figura C.8** Dos armaduras de puntal y tirante supuestas adicionales.

Usted puede ver que las hipótesis de las trayectorias de las fuerzas que intervienen en las armaduras descritas pueden variar un poco entre los diferentes proyectistas. Como resultado, no hay una solución correcta para un miembro específico diseñado por el método del puntal y del tirante.

## C.8 ÁNGULOS DE LOS PUNTALES EN LOS MODELOS DE ARMADURAS

Para esbozar la armadura, es necesario establecer la pendiente de las diagonales (el ángulo  $\theta$  en la figura C.8 que se mide desde la cuerda a tensión: el refuerzo para tensión). De acuerdo con Schlaich y Weischede, el ángulo de las trayectorias de los esfuerzos varía de aproximadamente  $68^\circ$  si  $l/d \geq 10$  a aproximadamente  $55^\circ$  si  $l/d = 2.0$ .<sup>1</sup> Una práctica bastante común, y que se usa en este apéndice y que generalmente es satisfactoria, es suponer una pendiente 2 vertical a 1 horizontal para los puntales. Esto conducirá a un valor de  $\theta = 63^\circ 56'$ . Las dimensiones seleccionadas para el modelo de armadura deben caber en la región D considerada, de modo que tal vez sea necesario ajustar los ángulos.

## C.9 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

En seguida se muestra un procedimiento paso por paso para usar el método de diseño del puntal y el tirante.

1. *Selección del modelo del puntal y el tirante.* Se selecciona una armadura para sustentar las cargas concentradas, y esa armadura se analiza.
2. *Diseño de los estribos verticales.* Se supone un tamaño de varilla para estribo, y se supone que su resistencia es igual a su área transversal multiplicada por su esfuerzo de fluencia. El número de estribos requeridos es igual a la fuerza vertical dividida entre la resistencia de uno de los estribos. Se determina la separación requerida de estos estribos. Si es demasiado grande o pequeña, se supone un tamaño diferente de estribos y se repite el procedimiento.
3. *Selección de las varillas de refuerzo horizontal a través de la viga perpendicular al claro.* El Capítulo 23 del código no requiere que se use refuerzo como éste, pero es probable que su uso reduzca apreciablemente el agrietamiento. Como resultado, podemos seleccionar una cantidad de acero igual a la listada en la sección 9.9.3.1 del código ACI para el diseño de vigas regulares de gran peralte. Ahí se da la ecuación  $A_{vh} = 0.0025b_w s_h$ , y se especifica que la separación de este tipo de refuerzo no exceda a  $d/5$  o bien 12 pulgadas.
4. *Cálculo de la resistencia de los puntales.* En seguida se aplica la ecuación 23.4.3 del ACI para revisar los tamaños necesarios de puntales. En los problemas reales, estos puntales son las diagonales. Como parte del cálculo, los espacios disponibles se comparan con los tamaños requeridos.
5. *Diseño de los tirantes paralelos al claro de la viga.* Los tirantes horizontales paralelos al claro de la viga son necesarios para resistir las fuerzas horizontales en los puntales y evitar que se agrieten. La resistencia de diseño de estos tirantes se proporciona mediante la ecuación 23.7.2 del ACI.
6. *Análisis de las zonas nodales.* Finalmente, la ecuación 23.9.2 del ACI se usa para determinar la resistencia de las zonas nodales. El lector debe observar que la sección 23.9.3 del ACI establece que no se requiere confinamiento de las zonas nodales.

<sup>1</sup>Jörg Schlaich y Dieter Weischede, *Detailing of Concrete Structures*, Bulletin d'Information 150, Comité Euro-International 'du Béton, París, marzo de 1982, 163 págs.