

ALCANCE DIGITAL N° 94



Año CXXXIV

San José, Costa Rica, viernes 13 de julio del 2012

N° 136

PODER EJECUTIVO

DECRETOS

N° 37070-MIVAH-MICIT-MOPT

“CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA 2010”
(CONSTA DE VEINTE TOMOS)

TOMO X

2012
Imprenta Nacional
La Uruca, San José, C. R.

CONSTRUIMOS UN PAÍS SEGURO



Gobierno de Costa Rica

10.4.2 Conexiones

10.4.2.1 Generalidades

Las conexiones que sean parte de los *sistemas sismorresistentes* deben cumplir con los requisitos del capítulo J de la referencia 1 y con los requisitos adicionales que se indiquen en este inciso.

Los empalmes y las bases de columnas que no formen parte de los *sistemas sismorresistentes* deben cumplir con los requisitos indicados en los incisos 10.4.2.5(a), 10.4.2.5(c), 10.4.2.6.

Los elementos que sean parte de una conexión que se indique en este capítulo o en la referencia 2 deben cumplir con los requisitos indicados en el inciso 10.4.1.3 para las zonas protegidas.

10.4.2.2 Conexiones empernadas

Las conexiones empernadas deben cumplir con los siguientes requisitos:

- a. Todos los pernos deben instalarse como pernos de alta resistencia, pretensados según la referencia 1. Las superficies de contacto se deben preparar según se requiera para juntas por fricción clase A o mejores correspondientes a conexiones por fricción según lo que se indica en la sección J3.8 de la referencia 1.

Excepción: para los siguientes casos se permite aplicar un revestimiento de pintura a las superficies que forman parte de una conexión con un coeficiente de fricción menor que las juntas de deslizamiento crítico clase A:

1. En conexiones del tipo placa extrema que cumplan los requisitos indicados en el inciso 10.5.1, o en la referencia 2.
 2. En conexiones empernadas donde el efecto de las cargas sísmicas se transmita ya sea por tracción en los pernos o por compresión por aplastamiento, pero no por cortante en los pernos.
- b. Los orificios deben ser orificios estándar o de *ranura corta* con la ranura perpendicular a la carga aplicada.

Excepción: para las riostras en diagonal especificadas en los incisos 10.5, 10.6 y 10.7, se permite perforar *orificios con sobredimensión* en solo una de las placas de conexión, únicamente cuando la conexión sea diseñada como conexión por fricción para la capacidad requerida indicada en estos incisos.

La capacidad en cortante de las juntas empernadas que utilicen orificios estándar debe calcularse de acuerdo con lo especificado para el tipo de juntas por aplastamiento, conforme a lo indicado en las secciones J3.6 y J3.10 de la referencia 1. La capacidad nominal por aplastamiento en los orificios no debe ser mayor que $2.4dtF_u$.

- c. Los pernos no deben ser diseñados para tomar carga en combinación con soldaduras que se encuentren actuando en el mismo plano de falla.

10.4.2.3 Conexiones soldadas

Las conexiones soldadas deben diseñarse de acuerdo a lo especificado en el capítulo J de la referencia 1

10.4.2.4 Placas de continuidad y rigidizadores

El diseño de las placas de continuidad y los rigidizadores ubicados entre alas de secciones de acero laminadas en caliente debe contemplar que las longitudes de contacto a las alas y almas de los elementos se reducen por los cortes de esquina, según se muestra en la figura 10.2.

10.4.2.5 Empalmes de columnas

a. Ubicación de empalmes

Para todas las columnas de la edificación, incluidas aquellas que no son parte de los *sistemas sismorresistentes*, los empalmes de columnas deben estar ubicados como mínimo a 1.2 m de distancia de las conexiones viga-columna.

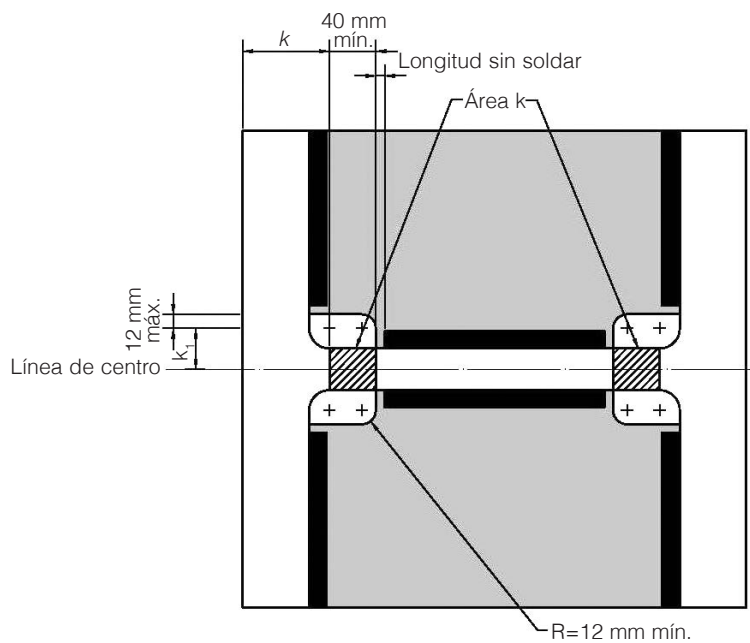
Excepciones:

1. Cuando la altura libre, H_L , entendida como la menor distancia entre el piso terminado y las alas inferiores de las vigas conectadas a la columna en el piso superior inmediato, sea menor que 2.4 m, los empalmes deben ubicarse en la mitad del claro libre.
2. Los empalmes de columnas con soldadura de penetración total, tanto en las alas como en las almas, pueden ubicarse más cerca de la unión viga-columna, pero no a menor distancia que la altura de la sección de la columna.

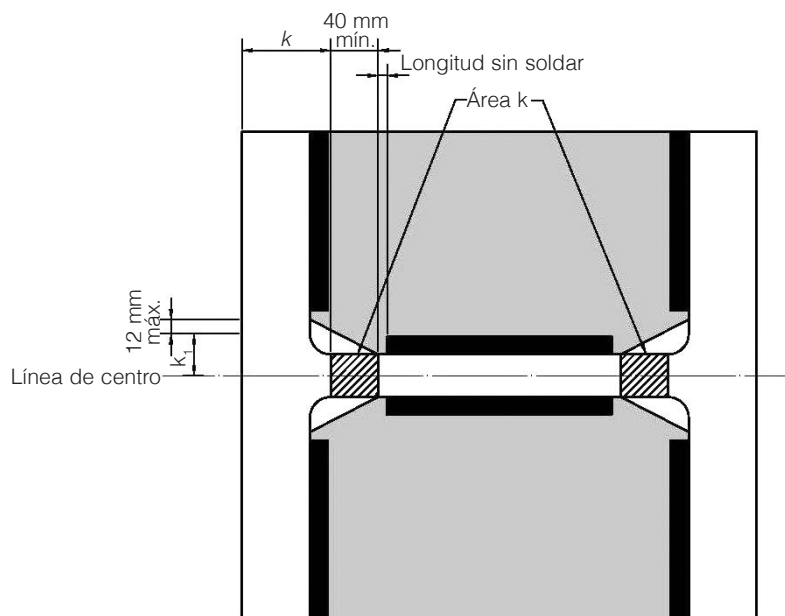
b. Capacidad requerida

La capacidad requerida para los empalmes de columnas en los *sistemas sismorresistentes*, debe ser la mayor de:

1. La capacidad requerida para las columnas, incluida la determinada según los artículos 10.5, 10.6 y 10.7 e inciso 10.4.1.4(a).
2. La capacidad requerida según las combinaciones de carga de las ecuaciones [6-1] a [6-4], incluyendo la carga sísmica amplificada, CS_a . Sin embargo, no es necesario que esta capacidad exceda la máxima demanda que pueda ser transferida al empalme por el sistema, determinada según los principios de diseño por capacidad.



Esquina curva



Esquina recta

Figura 10.2. Longitud de contacto reducida entre el rigidizador y el alma y las alas de la sección, producto del corte de esquina.

Los empalmes soldados en columnas donde cualquier parte de la columna está sujeta a un efecto de tracción neta según las combinaciones de carga (ecuaciones [6-3] y [6-4]) con la inclusión de CS_a deben cumplir con los siguientes requisitos:

- a. La capacidad disponible de uniones soldadas con soldadura de penetración parcial, debe ser al menos 200% de la capacidad requerida.
 - b. La capacidad mínima requerida de cada ala debe ser $0.5R_yF_yA_f$, donde R_yF_y es la capacidad esperada a cedencia del material de la columna y A_f es la menor área de las alas de las columnas conectadas.
 - c. Cuando se utilizan empalmes de tope con soldaduras de penetración total y los esfuerzos de tracción en cualquier punto del ala más pequeña excedan $0.30F_y$, se deben utilizar transiciones graduales entre las alas con espesor o ancho diferentes, según los requisitos de la cláusula 4.2 de la referencia 8.
- c. Capacidad requerida en cortante

Para todas las columnas del edificio, incluidas aquellas que no son parte de los *sistemas sismorresistentes*, la capacidad requerida en cortante en ambas direcciones ortogonales debe ser M_{pc} / H , donde M_{pc} es la menor capacidad plástica en flexión de las columnas en la dirección considerada, y H es la altura de piso a piso.

La capacidad requerida en cortante para los empalmes de las columnas de los *sistemas sismorresistentes* es la mayor entre la obtenida con el requisito anterior y la capacidad requerida según los incisos 10.4.2.5.(b)1 y 10.4.2.5.(b)2.

d. Configuración de empalmes en acero estructural

Se permite que los empalmes en acero estructural sean totalmente empernados, totalmente soldados, o empernados en una columna y soldados en la otra. La configuración del empalme debe cumplir con todos los requisitos específicos indicados en los incisos 10.5, 10.6 o 10.7 según corresponda.

Cuando las columnas de los *sistemas sismorresistentes* usen empalmes empernados en el alma, se deben usar placas o canales en ambos lados del alma de la columna.

En los empalmes soldados que utilicen soldaduras con bisel, las *placas de extensión de soldaduras* deben ser removidas según la cláusula 6.10 de la referencia 8. La *placa de respaldo* de las soldaduras con bisel no tiene que ser removida.

10.4.2.6 Placas de asiento de columnas

La capacidad requerida para las placas de asiento de las columnas, incluidas aquellas que no son parte de los *sistemas sismorresistentes*, debe ser calculada de acuerdo a este inciso.

La capacidad disponible de los elementos de acero en la base de la columna, incluidas placas base, pernos de anclaje, placas rigidizadoras y elementos o conectores de cortante, debe ser calculada según lo indicado en la referencia 1.

Cuando las columnas sean soldadas a la placa de asiento mediante soldaduras de penetración, las *placas de extensión de soldadura* y las *placas de respaldo de soldadura* deben ser removidas. No es necesario remover las placas de respaldo siempre y cuando se aplique una soldadura de filete de 8 mm entre la placa de respaldo y la placa de asiento.

La capacidad disponible de los elementos de concreto reforzado en la base de la columna y el desarrollo de los pernos de anclaje, debe ser calculada según el capítulo 8 de este código.

a. Capacidad axial requerida

La capacidad axial requerida para la placa de asiento de la columna, incluidas sus fijaciones a la fundación, es la suma de las componentes verticales de la capacidad requerida de todos los elementos de acero que se conectan a la base de la columna, pero no debe ser menor que:

1. La carga axial de la columna calculada según las combinaciones de carga [6-1] a [6-4], incluyendo la *carga sísmica amplificada*, CS_a .
2. La capacidad axial requerida para empalmes de columna prescrita en el inciso 10.4.2.5.

b. Capacidad requerida en cortante

La capacidad requerida en cortante para la placa de asiento de la columna, incluidas sus fijaciones a la fundación, es la suma de las componentes horizontales de la capacidad requerida de todos los elementos de acero que se conectan a la base de la columna, como sigue:

1. Para riostras diagonales, la componente horizontal es determinada a partir de la capacidad requerida de la conexión de la riostra diagonal para los *sistemas sismorresistentes*.
2. Para columnas, la componente horizontal es igual a la capacidad requerida en cortante de los empalmes, prescrita en el inciso 10.4.2.5(c).

c. Capacidad requerida en flexión

Cuando la conexión columna a fundación es considerada como conexión de momento, la capacidad requerida en flexión para la placa de asiento de la columna, incluidas sus fijaciones a la fundación, es la suma de

las capacidades requeridas de todos los elementos de acero que se conectan a la base de la columna, como sigue:

1. Para riostras diagonales, la capacidad requerida en flexión es por lo menos igual a la capacidad requerida en flexión de la conexión de la riostra diagonal.
2. Para columnas, la capacidad requerida en flexión es la menor de:
 - a. $1.1R_yF_yZ_c$ de la columna
 - b. El momento calculado usando las combinaciones de carga [6-1] a [6-4], incluyendo la *carga sísmica amplificada*, CS_a .

10.4.3 Compatibilidad de deformaciones de elementos y conexiones que no forman parte de los sistemas sismorresistentes

10.4.3.1 Elementos

Se requiere que haya compatibilidad de deformación de los elementos que no forman parte de los *sistemas sismorresistentes*. Estos elementos deben ser diseñados para resistir la combinación de los efectos de las cargas gravitacionales y las deformaciones producidas por la deriva inelástica calculada según el artículo 7.6.

10.4.3.2 Conexiones

Se requiere que haya compatibilidad de deformación de las conexiones que no formen parte de los *sistemas sismorresistentes*. Estas conexiones deben tener una capacidad rotacional mínima para ajustarse a las rotaciones producidas por la deriva inelástica calculada según el artículo 7.6.

Para demostrar que estas conexiones cumplen con la capacidad rotacional mínima requerida se puede utilizar uno de los siguientes métodos:

- i. Dimensionar la conexión para una capacidad mínima requerida calculada mediante las combinaciones de carga de [6-1] a [6-4], incluyendo los efectos de la *carga sísmica amplificada*, CS_a .
- ii. Utilizar una conexión cuya capacidad rotacional ante cargas cíclicas haya sido evaluada experimentalmente. Para sustentar el adecuado desempeño de la conexión, se pueden utilizar:
 1. Ensayos reportados en la literatura o ensayos documentados para otros proyectos, siempre que las condiciones sean similares y se cumplan los límites especificados en la sección K2 de la referencia 3.
 2. Ensayos realizados para el proyecto específico, siempre que sean representativos del tamaño de los elementos, la resistencia de los materiales, la configuración de las conexiones y los procesos de

construcción y se cumplan los límites especificados en la sección K2 de la referencia 3.

10.5 Sistemas de marcos

En esta sección se establecen los criterios de diseño y requisitos para la configuración de los elementos estructurales y de las conexiones de los *sistemas sismorresistentes* constituidos por marcos ordinarios, marcos intermedios, marcos especiales o marcos especiales a base de armaduras.

10.5.1 Marcos ordinarios (OMF)

10.5.1.1 Alcance

Los *sistemas sismorresistentes* a base de marcos ordinarios (OMF) de acero estructural deben ser diseñados de acuerdo con los lineamientos de este inciso. Se incluyen también los marcos de acero de sección variable tipo “industrial”.

10.5.1.2 Criterios de diseño

Los *sistemas sismorresistentes* a base de OMF deben ser diseñados para soportar deformaciones inelásticas mínimas en sus elementos y conexiones durante el *sismo de diseño*.

10.5.1.3 Requisitos de análisis

Para los *sistemas sismorresistentes* a base de OMF no hay requisitos especiales de análisis adicionales a los especificados en el artículo 10.3 y en el capítulo 7.

10.5.1.4 Requisitos del sistema

Los *sistemas sismorresistentes* a base de OMF no tienen requisitos especiales adicionales a los especificados en la referencia 1.

10.5.1.5 Elementos estructurales

Los elementos estructurales de los OMF no tienen requisitos de esbeltez local adicionales a los especificados en la tabla B4.1 de la referencia 1. El soporte lateral de los elementos y sus conexiones debe cumplir con lo establecido en la referencia 1. Los OMF no tienen zonas protegidas.

En un OMF, las vigas pueden ser sustituidas por armaduras. La capacidad requerida para la armadura debe ser determinada a partir de las fuerzas máximas que el sistema pueda transferir a la armadura, incluyendo los efectos

de la sobrerresistencia y el endurecimiento por deformación. Las conexiones de la armadura deben ser conexiones rígidas.

10.5.1.6 Conexiones

Las uniones viga-columna pueden ser rígidas o semirrígidas, según los requisitos de este inciso.

a. Soldaduras críticas por demanda

Las soldaduras de penetración completa entre las alas de la viga y la columna, se clasifican como *soldaduras críticas por demanda* y deben cumplir con los requisitos del inciso 10.1.3.4(b).

b. Requisitos para conexiones de momento rígidas

Cuando formen parte del *sistema sismorresistente*, las conexiones rígidas del OMF deben cumplir con al menos uno de los siguientes requisitos:

- i) Las conexiones de momento rígidas deben ser diseñadas para una capacidad en flexión requerida igual a $R_y M_n$ de la sección.

La capacidad requerida en cortante, V_u , de la conexión se determina usando las combinaciones [6-1] a [6-4], pero remplazando el efecto de la carga sísmica, CS , por la siguiente cantidad:

$$CS = k[R_y M_n] / L_{ef} \quad [10-9]$$

donde:

R_y = razón del *esfuerzo de cedencia esperado* entre el esfuerzo de cedencia mínimo especificado, F_y .

M_n = resistencia disponible de la sección.

L_{ef} = claro libre del elemento.

k = 1 cuando el elemento está en curvatura simple.

2 cuando el elemento está en doble curvatura.

- ii) Las conexiones de momento rígidas deben ser diseñadas para una capacidad requerida en flexión y una capacidad requerida en cortante igual al máximo momento y su cortante asociado que pueda ser transferido por el sistema a la conexión. Estas fuerzas de diseño se determinan a partir de las resistencias disponibles según el estado límite que controle el diseño de los elementos conectados, conforme el artículo 7.7.

- iii) Las conexiones de momento rígidas entre vigas de sección laminada en caliente y las alas de columnas laminadas en caliente deben cumplir con las disposiciones de los incisos 10.5.2.6 o 10.5.3.6, o alternativamente satisfacer todos los siguientes requisitos:

1. Todas las soldaduras en la conexión viga-columna deben satisfacer los requisitos del artículo B.3 del anexo B.
2. Las alas de la viga deben conectarse a las alas de la columna con soldaduras de penetración total.
3. La geometría de la perforación de acceso y sus requisitos de calidad deben cumplir con lo estipulado en la referencia 8.
4. Las placas de continuidad deben satisfacer los requisitos del inciso B2.4.4 del anexo B, excepto que la unión soldada de las placas de continuidad al ala de la columna puede ser fabricada con una soldadura de penetración total, con soldaduras de penetración parcial por ambos lados, o con soldaduras de filete por ambos lados. La resistencia requerida en estas soldaduras no debe ser menor a la resistencia de diseño del área de contacto de la placa de continuidad con el ala de la columna.
5. El alma de la viga debe ser conectada al ala de la columna mediante una soldadura de penetración total cuya longitud se extienda totalmente entre las perforaciones de acceso, o usando una conexión simple de placa empernada, diseñada para el cortante V_u dado por 10.5.1.6(b)i.

c. Requisitos para conexiones de momento semirrígidas

El uso de conexiones semirrígidas se permite cuando se cumpla con los siguientes requisitos:

- i) Las conexiones semirrígidas deben ser diseñadas para el momento y cortante máximo resultante de las combinaciones de carga [6-1] a [6-4].
- ii) La rigidez, resistencia y capacidad de deformación de las conexiones de momento semirrígidas, deben ser consideradas en el análisis, incluyendo el efecto de la estabilidad global del marco.
- iii) La capacidad nominal en flexión de la conexión, $M_{n,PR}$, no debe ser menor que el 50% del M_p de la viga conectada, excepto en estructuras de un solo nivel, donde $M_{n,PR}$, no puede ser menor que el 50% del M_p de la columna conectada.
- iv) Para las conexiones de momento semirrígidas, V_u debe ser calculado como se indica en el inciso 10.5.1.6(b)i, pero sustituyendo M_n por $M_{n,PR}$.

10.5.1.7 Elementos y conexiones que no formen parte del sistema sismorresistente

Los elementos y conexiones que no formen parte del *sistema sismorresistente* deben cumplir con las disposiciones del inciso 10.4.3.

10.5.2 Marcos intermedios (IMF)

10.5.2.1 Alcance

Los *sistemas sismorresistentes* a base de marcos intermedios (IMF) de acero estructural deben ser diseñados de acuerdo con los lineamientos de este inciso.

10.5.2.2 Criterios de diseño

Los *sistemas sismorresistentes* a base de IMF deben ser diseñados para soportar deformaciones inelásticas limitadas en sus elementos y conexiones durante el *sismo de diseño*. La capacidad de deformación inelástica limitada de un IMF se logra mediante la cedencia en flexión de sus vigas y columnas y la cedencia en cortante de la zona de panel de la columna. El diseño de las conexiones viga-columna, incluyendo la zona de panel y las placas de continuidad, debe cumplir con los requisitos del inciso 10.5.2.6(b), lo cual debe ser demostrado según lo establecido en el inciso 10.5.2.6(c).

10.5.2.3 Requisitos de análisis

Para los *sistemas sismorresistentes* a base de IMF no hay requisitos especiales de análisis adicionales a los especificados en el artículo 10.3 y en el capítulo 7.

10.5.2.4 Requisitos del sistema

a. Soporte lateral de vigas

Para garantizar su estabilidad, las vigas deben ser soportadas lateralmente según los requisitos para *elementos con ductilidad moderada* del inciso 10.4.1.2(a). Además, debe colocarse arriostramiento lateral donde haya cargas concentradas, cambios en la sección transversal y otros puntos donde el análisis indique la formación de una rótula plástica durante la respuesta inelástica del IMF. La colocación de todos los soportes laterales debe ser congruente con lo documentado en el anexo B para la conexión precalificada correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

La capacidad requerida para los soportes laterales en zonas de rótulas plásticas es la indicada en el inciso 10.4.1.2(c).

10.5.2.5 Elementos estructurales

a. Requisitos básicos

Las vigas y columnas que sean parte de un IMF deben satisfacer los requisitos para *elementos con ductilidad moderada* del inciso 10.4.1.

Las vigas de acero estructural que sean parte de un IMF pueden ser diseñadas en sección compuesta con la losa de entepiso para resistir las cargas gravitacionales.

b. Alas de vigas

En las regiones de rótulas plásticas, deben omitirse los cambios abruptos en la sección transversal del ala de la viga. Tampoco se permite la perforación de agujeros ni los recortes en el ala a menos que se pueda demostrar experimentalmente que la rótula plástica es estable y capaz de ajustarse al ángulo de deriva requerido. La configuración del ala de la viga debe ser congruente con la descrita en el anexo B para la conexión precalificada correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

c. Zonas protegidas

La región sujeta a deformaciones inelásticas en los extremos de las vigas debe ser considerada como *zona protegida* y debe cumplir con los requisitos del inciso 10.4.1.3. La extensión de la *zona protegida* es la especificada en el anexo B para la conexión precalificada correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

10.5.2.6 Conexiones

a. Soldaduras críticas por demanda

Las siguientes soldaduras en un IMF se consideran críticas por demanda y deben cumplir con lo estipulado en el inciso 10.1.3.4.b:

- i. Soldaduras de penetración en empalmes de columnas
- ii. Soldaduras en la unión de la columna con la placa base, excepto cuando se demuestre que alguna condición de restricción imposibilite la formación de una rótula plástica en la base de la columna y cuando las combinaciones de carga [6-1] a [6-4], calculadas considerando la *carga sísmica amplificada* CS_a , no resulten en un efecto neto de tracción en la base de la columna.
- iii. Soldaduras de penetración total en la unión de las alas y alma de la viga a la columna, siempre y cuando no se especifique lo contrario para la conexión precalificada correspondiente en el anexo B.

b. Requisitos para conexiones viga-columna

Todas las conexiones viga-columna que sean parte de un IMF deben satisfacer los siguientes requisitos:

- i. Tener suficiente capacidad de rotación para ajustarse de manera segura a un ángulo de deriva entre pisos ($\theta_i = \Delta/H_i$) de por lo menos 0.02 rad.

- ii. La capacidad en flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser igual o mayor que $0.80M_p$ de la viga conectada cuando se alcance una rotación de 0.02 rad.

c. Demostración de conformidad

Para demostrar que las conexiones viga-columna utilizadas en un IMF cumplen con los requisitos del inciso anterior, se puede utilizar alguno de los siguientes métodos:

- i. Utilizar las conexiones precalificadas descritas en el anexo B, diseñadas según las disposiciones de la referencia 2.
- ii. Utilizar otras conexiones que hayan sido precalificadas para uso en IMF, según los lineamientos de la sección K1 de la referencia 3.
- iii. Utilizar cualquier otra conexión cuyo desempeño ante cargas cíclicas haya sido evaluado experimentalmente. Para sustentar el adecuado desempeño de la conexión, se pueden utilizar:
 1. Ensayos reportados en la literatura o ensayos documentados para otros proyectos, siempre que las condiciones sean similares y se cumplan los límites especificados en la sección K2 de la referencia 3.
 2. Ensayos realizados para el proyecto específico, siempre que sean representativos del tamaño de los elementos, la resistencia de los materiales, la configuración de las conexiones y los procesos de construcción y se cumplan los límites especificados en la sección K2 de la referencia 3.

d. Capacidad requerida en cortante

La capacidad requerida en cortante, V_u , de la conexión se determina usando las combinaciones [6-1] a [6-4], pero remplazando el efecto de la carga sísmica, CS, por la siguiente cantidad:

$$CS = 2[1.1R_y M_p] / L_h \quad [10-10]$$

donde:

R_y = razón del esfuerzo de cedencia esperado entre el *esfuerzo de cedencia* mínimo especificado, F_y .

$M_p = F_y Z$ = momento plástico nominal de la sección.

L_h = distancia entre los puntos de formación de rótulas plásticas.

Este requisito también se aplica para conexiones precalificadas siempre y cuando no se especifique lo contrario en el anexo B para la conexión correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

e. Zona de panel

La zona de panel de un IMF no tiene requisitos adicionales a los especificados en la referencia 1. La capacidad requerida en cortante de la zona de panel, puede ser calculada según las combinaciones [6-1] a [6-4], usando la *carga sísmica* del análisis.

f. Placas de continuidad

En todos los nudos viga-columna se debe proveer placas de continuidad, según las disposiciones del inciso B.2.4.4 del anexo B. El espesor de las placas de continuidad debe ser determinado según los requisitos del inciso B.2.4.4(a). El espesor de la placa de continuidad también debe ser congruente con los requisitos del anexo B específicos para la conexión precalificada correspondiente.

g. Empalmes de columna

Los empalmes de columna deben satisfacer los requisitos del inciso 10.4.2.5.

En empalmes soldados, las soldaduras deben ser de penetración total.

En empalmes empernados, la resistencia requerida en flexión debe ser al menos igual a $R_y F_y Z_x$ de la columna más pequeña conectada. La resistencia requerida en cortante del empalme de almas, debe ser al menos igual a $\frac{\sum M_{pc}}{H_c}$, donde $\sum M_{pc}$ es la suma de las capacidades plásticas nominales de las columnas empalmadas $F_{yc} Z_c$ y H_c es la altura libre de la columna entre conexiones con las vigas (incluida la losa, en caso de que exista).

10.5.2.7 Elementos y conexiones que no formen parte del sistema sismorresistente

Los elementos y conexiones que no formen parte del *sistema sismorresistente* deben cumplir con las disposiciones del inciso 10.4.3.

10.5.3 Marcos especiales (SMF)

10.5.3.1 Alcance

Los *sistemas sismorresistentes* a base de marcos especiales (SMF) de acero estructural deben ser diseñados de acuerdo con los lineamientos de este inciso.

10.5.3.2 Criterios de diseño

Los *sistemas sismorresistentes* a base de *marcos especiales* (SMF) deben ser diseñados para soportar deformaciones inelásticas importantes con el *sismo de diseño*. La capacidad de deformación inelástica de un SMF se

logra mediante la cedencia en flexión de sus vigas y una cedencia limitada en cortante de la zona de panel de la columna. Excepto donde sea permitido por este inciso, las columnas deben ser diseñadas para tener una mayor capacidad que la demandada por las vigas totalmente plastificadas y endurecidas por deformación. En la base de las columnas se permite la cedencia en flexión. El diseño de las conexiones viga-columna, incluidas la zona de panel y las placas de continuidad, debe cumplir con los requisitos del inciso 10.5.3.6(b), lo cual debe ser demostrado según lo establecido en el inciso 10.5.3.6(c).

10.5.3.3 Requisitos de análisis

Para los *sistemas sismorresistentes* a base de SMF no hay requisitos especiales de análisis adicionales a los especificados en el artículo 10.3 y en el capítulo 7.

10.5.3.4 Requisitos del sistema

a. Razón de momentos columna-viga

Se debe satisfacer la siguiente relación en todas las uniones viga-columna:

$$\sum M_{pc}^* / \sum M_{pb}^* \geq 1.0 \quad [10-11]$$

donde:

$\sum M_{pc}^*$ = suma de capacidades nominales en flexión de las columnas conectadas al nudo con la reducción respectiva relacionada con la carga axial en la columna. Se puede tomar como:

$$\sum M_{pc}^* = \sum Z_c (F_{yc} - P_{uc} / A_g) \quad [10-12]$$

$\sum M_{pb}^*$ = suma de capacidades esperadas en flexión de las vigas conectadas al nudo. Se puede tomar como:

$$\sum M_{pb}^* = \sum (1.1 R_y M_p + M_v) \quad [10-13]$$

Alternativamente, para conexiones precalificadas, la determinación de

$\sum M_{pb}^*$ debe ser congruente con las disposiciones de diseño del anexo B y la referencia 2.

No es necesario que las columnas cumplan con la razón de momentos de este inciso, siempre y cuando se cumpla una de las siguientes condiciones:

i. Columnas en las cuales $P_{uc} < 0.3P_c$, donde $P_c = F_{yc} A_g$ para todas las combinaciones de carga [6-1] a [6-4] y que cumplan con uno de los siguientes requisitos:

1. Las columnas son parte de una edificación de un solo nivel o del último nivel de una edificación de varios niveles.
2. Columnas donde: (a) la suma de la capacidad nominal en cortante de todas las columnas eximidas en el nivel considerado es menor que el 20% de la suma de la capacidad nominal en cortante de todas las columnas de ese nivel que formen parte del SMF y que actúan en la misma dirección; y (b) la suma de la capacidad nominal en cortante de todas las columnas eximidas en cada línea de columnas en el nivel considerado, es menor que el 33% de la suma de la capacidad nominal en cortante de todas las columnas de esa línea de columnas que formen parte del SMF. Se define línea de columnas como una única fila de columnas o varias filas de columnas paralelas ubicadas dentro de un 10% de la dimensión en planta perpendicular a la fila de columnas.

ii. Columnas de cualquier nivel que tenga una razón de capacidad nominal entre capacidad requerida en cortante que sea 50% mayor que el nivel superior.

b. Soporte lateral de vigas

Las vigas deben ser arriostradas para estabilidad según los requisitos para vigas con ductilidad óptima contenidos en el inciso 10.4.1.2(b).

Además, se deben colocar soportes laterales en zonas de cargas concentradas, cambios en la sección transversal, y otros lugares donde el análisis indique la formación de rótulas plásticas durante la respuesta inelástica del SMF. Para conexiones precalificadas, el soporte lateral de vigas debe ser congruente con las disposiciones del anexo B y la referencia 2.

La capacidad requerida para los soportes laterales en zonas de rótulas plásticas se debe determinar según el inciso 10.4.1.2(c).

c. Soporte lateral de conexiones viga-columna

i. Conexiones con soporte lateral

Cuando las almas de la viga y la columna son coplanares y la columna permanece elástica fuera de la zona de panel, las alas de las columnas requieren soporte lateral solamente a nivel de las alas superiores de vigas. Se puede suponer que la columna permanece elástica cuando la razón de momentos columna-viga (inciso 10.5.3.4(a)) es mayor que 2.0.

Cuando la columna no permanece elástica fuera de la zona de panel, se debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Se debe proveer soporte lateral a las alas de la columna a nivel de las alas superior e inferior de la viga conectada.
 2. Cada soporte lateral debe ser diseñado para una capacidad requerida igual al 2% de la capacidad nominal del ala de la viga ($F_y b_f t_{bf}$).
 3. El soporte lateral puede ser directo (por medio de la losa de entrepiso u otros elementos conectados al ala de la columna) o indirecto (por medio del alma de la columna o de las alas de vigas perpendiculares).
- ii. Conexiones sin soporte lateral

Las columnas que son parte de un SMF y que no tienen arriostramiento lateral por medio de elementos perpendiculares a la conexión, deben ser diseñadas considerando la longitud máxima entre puntos de arriostramiento lateral para el cálculo del pandeo en el sentido perpendicular al SMF, según lo establecido en el capítulo H de la referencia 1, excepto que:

1. La capacidad requerida de la columna se determina a partir de las combinaciones de carga [6-1] a [6-4], pero sustituyendo el efecto de la carga de sismo por el menor de:
 - a. la *carga sísmica amplificada*, CS_a ,
 - b. 125% de la capacidad nominal del marco, basada en la capacidad nominal en flexión de la viga o en la capacidad nominal en cortante de la zona de panel.
2. La esbeltez L/r de la columna no debe exceder 60.
3. La capacidad en flexión requerida de la columna en el sentido transversal al marco debe incluir el momento producido por la fuerza transversal del ala de la viga especificada en 10.5.3.4(c)i.2 y el momento de segundo orden que resulta del desplazamiento lateral de la columna.

10.5.3.5 Elementos estructurales

a. Requisitos básicos

Las vigas y columnas que sean parte de un SMF deben satisfacer los requisitos para *elementos con ductilidad óptima* dadas en el inciso 10.4.1.1.

Las vigas de acero estructural que sean parte de un SMF pueden ser diseñadas en sección compuesta con la losa de entrepiso para resistir las cargas gravitacionales.

b. Alas de vigas

En las regiones de rótulas plásticas, deben omitirse los cambios abruptos en la sección transversal del ala de la viga. Tampoco se permite la perforación de agujeros ni los recortes en el ala a menos que se pueda demostrar experimentalmente que la rótula plástica es estable y capaz de ajustarse al ángulo de deriva requerido. La configuración del ala de la viga debe ser congruente con la descrita en el anexo B para la conexión precalificada correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

c. Zonas protegidas

La región sujeta a deformaciones inelásticas en los extremos de las vigas debe ser considerada como *zona protegida* y debe cumplir con los requisitos del inciso 10.4.1.3. La extensión de la *zona protegida* es la especificada en el anexo B para la conexión precalificada correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

10.5.3.6 Conexiones

a. Soldaduras críticas por demanda

Las siguientes soldaduras en un SMF se consideran críticas por demanda y deben cumplir con lo estipulado en el inciso 10.1.3.4(b):

- i. Soldaduras de penetración en empalmes de columna
- ii. Soldaduras en la unión de la columna con la placa base, excepto cuando se demuestre que alguna condición de restricción imposibilite la formación de una rótula plástica en la base de la columna y cuando las combinaciones de carga [6-1] a [6-4], calculadas considerando la *carga sísmica amplificada* CS_a , no resulten en un efecto neto de tracción en la base de la columna.
- iii. Soldaduras de penetración total en la unión de las alas y alma de la viga a la columna, siempre y cuando no se especifique lo contrario para la conexión precalificada correspondiente en el anexo B.

b. Requisitos para conexiones viga-columna

Todas las conexiones viga-columna que sean parte de un SMF deben satisfacer los siguientes requisitos:

- i. Tener suficiente capacidad de rotación para ajustarse de manera segura a un ángulo de deriva entre pisos ($\theta_i = \Delta/H_i$) de por lo menos 0.04 rad.

- ii. La capacidad mínima en flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser igual a $0.80M_p$ de la viga conectada, a una rotación de 0.04 rad.

c. Demostración de conformidad

Para demostrar que las conexiones viga-columna utilizadas en un SMF cumplen con los requisitos del inciso anterior, se puede utilizar alguno de los siguientes métodos:

- i. Utilizar las conexiones precalificadas descritas en el anexo B, diseñadas según las disposiciones de la referencia 2.
- ii. Utilizar otras conexiones que hayan sido precalificadas para uso en SMF, según los lineamientos de la sección K1 de la referencia 3.
- iii. Utilizar cualquier otra conexión cuyo desempeño ante cargas cíclicas haya sido evaluado experimentalmente. Para sustentar el adecuado desempeño de la conexión, se pueden utilizar:
 1. Ensayos reportados en la literatura o ensayos documentados para otros proyectos, siempre que las condiciones sean similares y se cumplan los límites especificados en la sección K2 de la referencia 3.
 2. Ensayos realizados para el proyecto específico, siempre que sean representativos del tamaño de los elementos, la resistencia de los materiales, la configuración de las conexiones y los procesos de construcción, y se cumplan los límites especificados en la sección K2 de la referencia 3.

d. Capacidad requerida en cortante

La capacidad requerida en cortante, V_u , de la conexión debe ser determinada mediante las combinaciones [6-1] a [6-4], pero remplazando el efecto de la carga sísmica, CS , por la siguiente cantidad:

$$CS = 2[1.1R_y M_p] / L_h \quad [10-14]$$

donde:

R_y = razón del *esfuerzo de cedencia esperado* entre el esfuerzo de cedencia mínimo especificado, F_y .

$M_p = F_y Z$ = momento plástico nominal de la sección.

L_h = distancia entre los puntos de formación de rótulas plásticas.

Este requisito también se aplica para conexiones precalificadas siempre y cuando no se especifique lo contrario en el anexo B para la conexión correspondiente o según ensayos específicos de precalificación realizados según las disposiciones de las secciones K1 y K2 de la referencia 3.

e. Zona de panel

i. Capacidad requerida en cortante

La capacidad requerida en cortante de la zona de panel debe ser determinada a partir de la sumatoria de los momentos en las caras de la columna. Estos momentos corresponden a la proyección del momento plástico nominal en las rótulas plásticas a las caras de la columna.

La capacidad de diseño de la zona de panel es $\phi_v R_n$, donde:

$$\phi_v = 1.0$$

R_n = capacidad nominal correspondiente al estado limite de cedencia en cortante, según la sección J10.6 de la referencia 1.

Alternativamente, el espesor requerido de la zona de panel puede ser determinado según el método utilizado para dimensionar la zona de panel de la conexión ensayada o precalificada.

ii. Espesor de la zona de panel

Tanto el espesor del alma de la columna como el espesor de las placas de refuerzo del alma, si se utilizan, deben satisfacer el siguiente requisito:

$$t \geq \frac{d_z + w_z}{90} \quad [10-15]$$

donde:

t = espesor del alma o de la placa de refuerzo del alma.

d_z = distancia vertical entre las placas de continuidad.

w_z = distancia horizontal entre las alas de la columna.

Alternativamente, cuando el pandeo local del alma de la columna y de la placa de refuerzo se previene uniéndolas con soldaduras de tapón se permite que el espesor total de la zona de panel cumpla con la ecuación [10-15]. En este caso el espesor de la placa de refuerzo se determina utilizando la ecuación [10-15], tomando d_z y w_z como la mayor de las dimensiones entre la soldadura de tapón o entre estas y el borde de la placa.

iii. Placas de refuerzo de alma

Cuando el espesor del alma de la columna no cumpla con 10.5.3.6(e)ii, las placas de refuerzo de alma deben ser colocadas directamente contra el alma de la columna. Cuando el alma de la columna cumpla con el espesor mínimo indicado en 10.5.3.6(e)ii, las placas de refuerzo del alma pueden ser colocadas directamente contra el alma de la columna o separadas de ella.