

“Diseño sísmico de estructuras mixtas”.

Ricardo Herrera M., Ph.D.¹

Resumen

El uso de estructuras mixtas posee ventajas innegables desde el punto de vista estructural y constructivo. Este tipo de estructuras están siendo utilizadas en forma creciente en zonas de alta sismicidad, lo cual ha requerido la creación de disposiciones especiales de diseño sismorresistente para estructuras mixtas. Estas disposiciones, inicialmente basadas en las de estructuras convencionales de acero u hormigón armado, han evolucionado con el avance del conocimiento, incorporando resultados experimentales y analíticos de investigaciones realizadas durante los últimos años, principalmente en Japón y Estados Unidos. Este artículo presenta un resumen de las disposiciones de diseño sismorresistente aplicables específicamente a estructuras mixtas, disponibles en normas usadas comúnmente como referentes en Latinoamérica.

Introducción

El diseño sismorresistente de estructuras sísmicas es un tema relativamente nuevo en la historia de la ingeniería estructural. Sólo en 1997, el AISC editó la primera versión de las disposiciones sísmicas para diseño de elementos y sistemas estructurales (AISC 1997), que incluía la Parte II sobre sistemas mixtos acero/hormigón. Algo similar ocurrió con las recomendaciones para la determinación de la demanda sísmica sobre estructuras mixtas: hasta hoy persisten en especificaciones sísmicas, parámetros de diseño que fueron tomados de estructuras convencionales de perfiles de acero o de hormigón armado.

Sin embargo, los resultados de numerosas investigaciones sobre la respuesta sísmica de estructuras mixtas realizadas en los últimos años, han permitido gradualmente la verificación, calibración y ampliación de las disposiciones de diseño sismorresistente existentes.

Este artículo presenta un resumen de las disposiciones de diseño sismorresistente para estructuras mixtas, disponibles en normas que son regularmente usadas como referente en Latinoamérica. Por razones de mayor claridad, el artículo está dividido en dos partes: la primera está dedicada a la determinación de la demanda sísmica; y la segunda, a los requisitos específicos exigidos a elementos y sistemas estructurales mixtos, cuando se utilizan en construcción sismorresistente.

Determinación de la demanda sísmica sobre estructuras mixtas

De acuerdo al estado del arte de las normas de diseño sismorresistente actualmente vigentes, el procedimiento para la determinación de la demanda sísmica sobre una estructura es el siguiente:

1. Determinación de la demanda elástica en un lugar determinado: basándose en la caracterización de la sismicidad regional (macrozonificación) y los efectos locales de suelo (microzonificación), se determina la respuesta de una estructura elástica a un terremoto de ciertas características, asimilable, en general, a un “terremoto de diseño”. Esta demanda se expresa normalmente en términos de un corte basal, expresado como porcentaje del peso que deberá soportar la

¹ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile. Email: riherrer@ing.uchile.cl

- estructura (incluyendo una fracción de la carga de uso) como carga lateral equivalente.
2. Reducción de la demanda: esta reducción se hace a través de un factor de modificación de la respuesta estructural, comúnmente denominado R , el cual depende del nivel de sobrerresistencia y la capacidad de deformación inelástica del tipo de estructura.
 3. Distribución del corte basal en altura: el corte basal se distribuye en todos los niveles del piso, generalmente en función del periodo del modo fundamental traslacional.
 4. Determinación de esfuerzos: usando un modelo elástico lineal de la estructura, se determinan los esfuerzos (fuerza axial, flexión, corte) generados en los elementos del sistema estructural por las cargas laterales equivalentes por piso.
 5. Determinación de desplazamientos entre pisos: usando el mismo modelo, se determinan los desplazamientos entre pisos sucesivos, además del desplazamiento de techo.
 6. Estimación de la demanda inelástica de desplazamientos: los resultados de desplazamientos obtenidos en el paso anterior se amplifican por un factor para estimar el desplazamiento real que sufrirá la estructura bajo el “terremoto de diseño”.
 7. Evaluación del diseño: los valores de esfuerzos internos y desplazamientos se comparan con las capacidades nominales y desplazamientos máximos admisibles, respectivamente. Las primeras se obtienen de las normas de diseño sismorresistente de elementos, mientras que los segundos son entregados por la misma especificación que determina la demanda sísmica.

La base de este proceso se presenta en forma esquemática en la Figura 1.

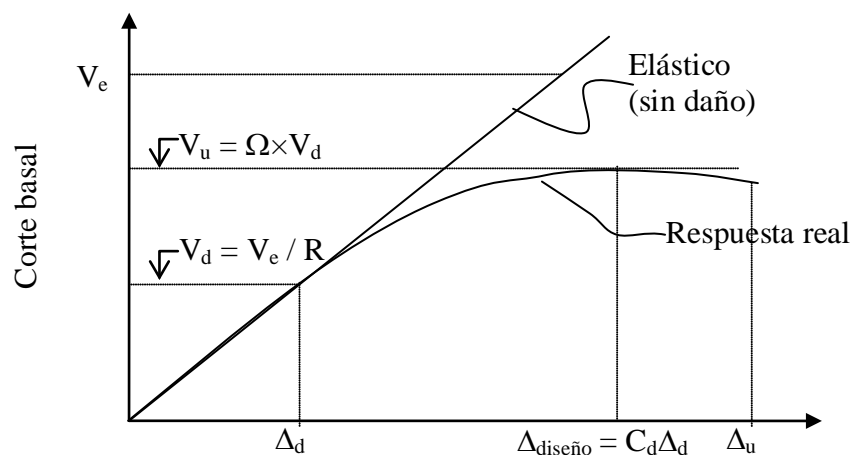


Figura 1: Conceptos básicos de desplazamiento sismorresistente actual

Considerando el esquema de la Figura 1, existen tres parámetros de diseño que son dependientes del sistema estructural considerado: el factor de modificación de la respuesta, R ; el factor de amplificación del desplazamiento, C_d ; y el factor de sobrerresistencia, Ω . Como la demanda elástica está definida por la ubicación geográfica, se necesita conocer estos tres parámetros para estimar la demanda reducida para la cual se diseñará la estructura, los desplazamientos que ésta alcanzará para ese nivel de demanda y la máxima capacidad que podrá desarrollar.

Uno de las especificaciones que propone valores de estos parámetros de diseño para sistemas estructurales mixtos, es la ASCE 7-05 [4]. La Tabla 1 contiene un extracto de estos valores para el caso de sistemas convencionales típicos de hormigón o acero, como marcos rígidos, marcos arriostrados y sistemas de muros.

Tabla 1: Parámetros de diseño de acuerdo a ASCE 7-05 [5]

Sistema estructural	R	Ω	C_d
Muros de hormigón armado especiales	5	2 ½	5
Marcos de acero especiales arriostrados concéntricamente	6	2	5
Marcos de acero corrientes arriostrados concéntricamente	3 ¼	2	3 ¼
Marcos mixtos arriostrados excéntricamente	8	2	4
Marcos mixtos arriostrados concéntricamente	5	2	4 ½
Marcos mixtos corrientes arriostrados	3	2	3
Muros de placa de acero y hormigón	6 ½	2 ½	5 ½
Muros especiales de hormigón con elementos de acero	6	2 ½	5
Muros corrientes de hormigón con elementos de acero	5	2 ½	4 ½
Marcos rígidos especiales de acero	8	3	5 ½
Marcos rígidos corrientes de acero	3 ½	3	3
Marcos rígidos especiales de hormigón armado	8	3	5 ½
Marcos rígidos corrientes de hormigón armado	3	3	2 ½
Marcos rígidos mixtos especiales	8	3	5 ½
Marcos rígidos mixtos intermedios	5	3	4 ½
Marcos rígidos mixtos corrientes	3	3	2 ½
Marcos mixtos semirrígidos	6	3	5 ½

En esta tabla se puede observar que los sistemas estructurales mixtos tienen parámetros de diseño similares a los mismos sistemas en acero u hormigón armado. Esto se explica porque inicialmente se replicaron los parámetros de sistemas convencionales para sistemas mixtos. La validez de estos parámetros ha sido verificada experimentalmente para algunos sistemas estructurales, a través de ensayos de sistemas estructurales completos como los realizados por Herrera et al. [6], Tsai et al. [7] y Fahnestock et al. [5].

Para el diseño de los elementos estructurales, ASCE 7-05 [5] remite a las normas ACI 318-05 [1], AISC LRFD [3] y AISC Seismic [2]. Las disposiciones de las dos primeras serán analizadas en una publicación especial sobre diseño de elementos mixtos, por lo que en lo que resta de este artículo sólo se revisará las disposiciones de la última.

Requisitos para elementos y estructuras mixtas usadas en sistemas sismorresistentes

El año 2005, el AISC publicó la última versión de sus disposiciones sísmicas [3]. Estas disposiciones recogen toda la experiencia y conocimiento adquirido luego de los terremotos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995. Además, nuevas tecnologías y sistemas estructurales que surgieron después de la aparición de la edición de 1997 de este documento han sido incluidas.

Las disposiciones sísmicas complementan la especificación AISC general [4] para el caso de estructuras cuya respuesta ante sismos requiera un nivel de ductilidad significativo. En todo aquello en que las disposiciones sísmicas no se pronuncien, debe utilizarse la especificación general.

La Parte II de las disposiciones sísmicas está dedicada completamente al caso de sistemas estructurales mixtos cuyo factor R sea superior a 3. Refiriéndose a la Tabla 1, estas disposiciones no serían aplicables, por ejemplo, a marcos mixtos corrientes, rígidos o arriostrados. Sin embargo, se debe considerar que el ASCE 7-05 [5] restringe al uso de estructuras de baja ductilidad ($R \leq 3$) en zonas de alta sismicidad.

Solicitaciones y combinaciones de carga

Al igual que la especificación general, las *Disposiciones* tienen que ver con la determinación de la resistencia nominal de elementos y sistemas estructurales sometidos a ciertas solicitaciones y no con la definición de éstas. Estas solicitaciones deben ser determinadas y combinadas utilizando las normas aplicables en cada país. Los requisitos de deformaciones máximas también deben ser establecidos por estas normas. En ausencia de estas normas, debe usarse las disposiciones del ASCE 7-05 [5].

Materiales

Para poder lograr una ductilidad significativa es necesario partir con un material que tenga esta característica. Los requisitos sobre el acero estructural son los mismos que se exigen para estructuras de acero convencionales en la Parte I. Algunos de los aceros admisibles se listan en la Tabla 2. En cuanto, a los requisitos sobre el hormigón y el acero de refuerzo, estos deben cumplir con lo exigido por el Capítulo 21 del ACI318-05 [1], salvo que se trate de estructuras de baja ductilidad.

Tabla 2: Aceros permitidos para uso sísmico

A36
A53
A500 grado B y C
A501
A529
A572 grados 42, 50 y 55
A588
A913 grado 50, 60 y 65
A992
A1011 HSLAS grado 55

Elementos mixtos

Columnas de acero embebidas en hormigón

Un ejemplo de este tipo de elementos mixtos se muestra en la Figura 2. Para calificar como columna mixta, el área de acero estructural debe ser por lo menos un 1% del área

total de la sección mixta, además de cumplir los requisitos del Capítulo I de la especificación AISC [4]. Los requisitos sobre la columna mixta cambian, dependiendo de si estas columnas son parte de un sistema estructural común, intermedio o especial.

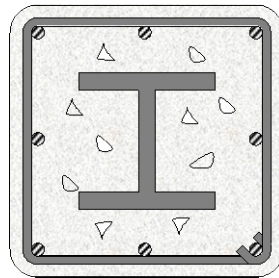


Figura 2: Perfil de acero embebido en hormigón

Columnas en sistemas corrientes

Las columnas mixtas en sistemas corrientes deben cumplir los siguientes requisitos:

- (1) La resistencia al corte de la columna debe ser determinada de acuerdo a la especificación AISC [4]. La resistencia al corte del refuerzo transversal de la sección debe determinarse usando las disposiciones de ACI 318-05 [1], considerando un ancho de la sección igual al ancho total del elemento menos el ancho de la sección de acero embebida, en la dirección perpendicular a la de aplicación del corte.
- (2) Las columnas mixtas en que se requiere acción conjunta de acero y hormigón deben tener conectores de corte capaces de transferir esfuerzos entre la sección de acero y el hormigón circundante, que cumplan con los requisitos de la Sección I2.1 de la especificación AISC [4].
- (3) El espaciamiento máximo del refuerzo transversal no debe exceder el menor valor entre: 16 veces el diámetro del refuerzo longitudinal; 48 veces el diámetro del refuerzo transversal; y la mitad de la dimensión menor de la sección mixta. El diámetro de este refuerzo no debe ser menor que 1/50 de la dimensión mayor de la sección compuesta, pero no es necesario que sea menor que 10 [mm] ni mayor que 19 [mm]. Puede usarse alternativamente malla de acero electrosoldada con un área equivalente, como refuerzo transversal.
- (4) Para refuerzo requerido por resistencia, se debe cumplir con los requisitos de detallamiento y empalme de la especificación ACI 318-05 [1]. Este tipo de refuerzo debe colocarse por lo menos en cada una de las esquinas de la sección mixta.
- (5) Los empalmes y detalles de contacto en los extremos deben diseñarse de acuerdo a las especificaciones AISC [4] y ACI 318-05 [1], incluyendo las disposiciones sísmicas del Capítulo 21 de esta última. El diseño debe considerar efectos adversos de cambios abruptos de rigidez o resistencia, como transiciones a columnas de hormigón armado o de acero convencionales y conexión a fundaciones.

Columnas en sistemas intermedios

Además de cumplir los requisitos anteriores, las columnas mixtas en sistemas intermedios deben cumplir lo siguiente:

- (1) El espaciamiento máximo del refuerzo transversal en los extremos de la columna compuesta no debe exceder el menor valor entre: la mitad de la dimensión

menor de la sección; 8 diámetros del refuerzo longitudinal; 24 diámetros del refuerzo transversal; o 300 [mm]. Este espaciamiento debe mantenerse en una longitud, en cada extremo del elemento, no inferior al máximo entre 1/6 de la altura libre de la columna, la dimensión mayor de la sección transversal o 450 [mm].

- (2) El espaciamiento en el resto de la columna no puede exceder dos veces el espaciamiento anterior.
- (3) No se permite el uso de mallas electrosoldadas como refuerzo transversal

Columnas en sistemas especiales

Además de los requisitos para sistemas intermedios y corrientes, las columnas mixtas que forman parte de sistemas especiales deben cumplir con lo siguiente:

- (1) La resistencia requerida de la columna y los empalmes de columna deben cumplir con los requisitos para columnas de acero, en la Sección 8.3 de la Parte I de las disposiciones sísmicas.
- (2) El refuerzo longitudinal necesario por resistencia debe cumplir con los requisitos del Capítulo 21 de ACI 318-05 [1].
- (3) Deben usarse estribos como refuerzo transversal, de acuerdo a lo especificado en el Capítulo 21 de ACI 318-05 [1]. Si el perfil de acero embebido no es capaz de soportar por sí solo la carga asociada a una combinación $1.0D+0.5L$ (donde D es carga permanente y L es carga de uso), se exige una cuantía mínima de refuerzo transversal. El espaciamiento máximo del refuerzo transversal no debe exceder 6 diámetros del refuerzo longitudinal, ni 150 [mm]. Para columnas que caigan en los puntos siguientes, el espaciamiento del refuerzo transversal no debe exceder $\frac{1}{4}$ de la dimensión menor de la sección mixta, ni 100 [mm]. Para estos casos, la armadura de confinamiento debe espaciarse como máximo a 350 [mm] en la dirección transversal.
- (4) Columnas embebidas parte de marcos arriostrados, con compresiones mayores al 20% de la capacidad de la columna deben tener armadura de confinamiento de acuerdo al punto (3) en toda su longitud, a menos que el perfil de acero por sí solo sea capaz de soportar la carga asociada a una combinación $1.0D+0.5L$.
- (5) Columnas embebidas que soporten elementos rígidos discontinuados, como muros o marcos arriostrados deben tener refuerzo transversal espaciado de acuerdo al punto (3).
- (6) Columnas embebidas en marcos rígidos especiales mixtos deben tener refuerzo transversal espaciado de acuerdo al punto (3) en ambos extremos de la columna. Además, deben satisfacer el criterio de viga débil/columna fuerte y la conexión de la columna a la fundación debe ser capaz de soportar la rotulación plástica de la columna en la base. Finalmente, la resistencia requerida a corte debe cumplir con los requisitos del Capítulo 21 de ACI 318-05 [1].
- (7) Cuando la columna termina en una fundación aislada o en una losa de fundación, el refuerzo transversal debe continuarse en la fundación en una profundidad de al menos 300 [mm]. Si la columna termina en un muro, la armadura de refuerzo transversal debe continuarse dentro del muro en una longitud que asegure la fluencia de la sección embebida y el acero de refuerzo longitudinal.

Columnas tubulares de acero rellenas de hormigón

Este tipo de elementos se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.

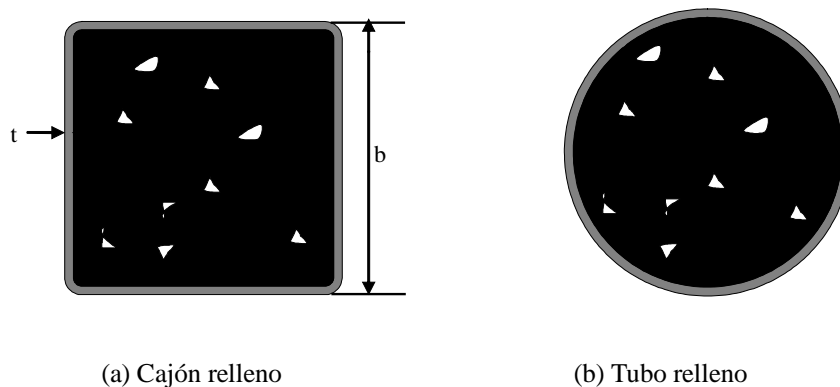


Figura 3: Columnas tubulares rellenas de hormigón

Este tipo de columnas mixtas deben cumplir los siguientes requisitos:

- (1) La resistencia al corte de la columna debe ser determinada usando sólo la capacidad de la sección tubular de acero. Puede utilizarse la resistencia del hormigón de relleno si se provee un mecanismo de transferencia de carga adecuado.
- (2) Para columnas en sistemas especiales mixtos las cargas de diseño y los empalmes de columna deben cumplir con los requisitos para columnas de acero, en la Sección 8 de la Parte I de las disposiciones sísmicas.
- (3) En el caso de columnas en marcos rígidos especiales mixtos la resistencia requerida a corte debe cumplir con los requisitos del Capítulo 21 de ACI 318-05 [1], deben satisfacer el criterio de viga débil/columna fuerte y la conexión de la columna a la fundación debe ser capaz de soportar la rotulación plástica de la columna en la base. Finalmente, el espesor mínimo de una sección tubular rectangular de acero debe ser

$$t_{\min} = b \sqrt{F_y / 2E}$$

donde F_y es la tensión de fluencia del acero, b es el ancho recto de la pared del tubo y E es el módulo de elasticidad del acero.

Conexiones en sistemas mixtos

Las conexiones en sistemas mixtos deben tener resistencia, ductilidad y tenacidad comparable a la de conexiones similares en estructuras sismorresistentes de acero o de hormigón armado

Las conexiones deben tener una capacidad de deformación adecuada para soportar la resistencia requerida y la deriva de diseño. Cuando la resistencia de los elementos conectados se determina usando propiedades nominales, el diseño de la conexión debe considerar que estos elementos van a desarrollar una resistencia real superior a la nominal.

Los modelos de las conexiones usados para análisis deben cumplir con los siguientes requisitos:

- (1) Cuando sea necesario, las fuerzas deben transferirse entre acero y hormigón armado a través de contacto directo de conectores de corte u otros conectores mecánicos, fricción o una combinación de estos mecanismos. La adherencia entre hormigón y acero debe despreciarse para efectos del mecanismo de transferencia de fuerzas. La contribución de los diferentes mecanismos sólo puede combinarse si la rigidez y capacidad de deformación de los mecanismos es compatible. Las resistencias asociadas al aplastamiento y a la fricción deben

cumplir con los requisitos de ACI 318-05 [1]. Estas resistencias deben ser reducidas en un 25% para marcos mixtos rígidos especiales, marcos mixtos especiales arriostrados concéntricamente, marcos mixtos arriostrados excéntricamente, muros mixtos especiales de hormigón armado con elementos de acero estructural, y muros de placas de acero embebidas en hormigón.

- (2) Los componentes de acero de las conexiones deben dimensionarse de acuerdo a la Parte I de las disposiciones sísmicas y la especificación AISC [4]. Aquellos elementos que se encuentran embebidos en hormigón pueden considerarse arriostrados contra el pandeo fuera del plano. Se requiere placas de contacto (atiesadores) entre las alas de la viga cuando ésta queda embebida en columnas o muros de hormigón armado.
- (3) La resistencia nominal de la zona de panel en columnas embebidas en hormigón, debe calcularse como la suma de la resistencia del acero y el hormigón confinado en esa zona, de acuerdo a la Parte I de las disposiciones sísmicas y ACI 318-05[1], respectivamente.
- (4) Se debe proveer refuerzo para tomar la tracción que se pueda desarrollar en las componentes de hormigón armado de una conexión mixta y el hormigón debe estar adecuadamente confinado con refuerzo transversal.
- (5) Para conexiones entre vigas de acero estructural o mixtas y columnas de hormigón armado o columnas de acero embebidas en hormigón, se debe cumplir los requisitos del Capítulo 21 de ACI 318-05 [1], con las siguientes modificaciones:
 - a. Se considera que las secciones de acero que llegan al nudo proveen confinamiento al hormigón en un ancho igual al de la placa de contacto soldada a las alas de la viga (ver Figura 4).

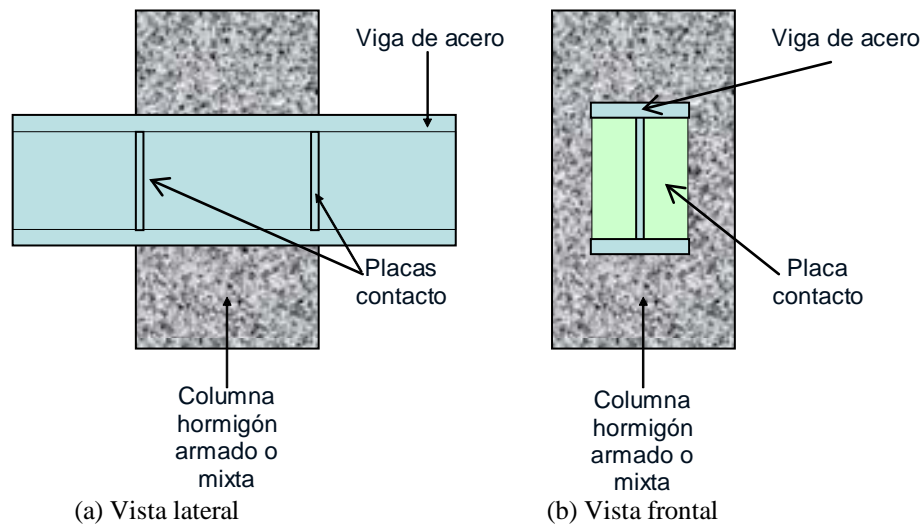


Figura 4: Conexión viga de acero a columna de hormigón armado o columna de acero embebida en hormigón

- b. Se permiten empalmes perimetrales de estribos en la zona en que las placas de contacto proveen confinamiento, para marcos mixtos rígidos intermedios y corrientes, marcos mixtos arriostrados corrientes y muros mixtos corrientes de hormigón armado con elementos de acero estructural.
- c. El tamaño y ubicación de las barras de refuerzo longitudinales deben detallarse para minimizar el deslizamiento de las barras a través del

nudo, debido a la alta transferencia de fuerzas asociada con el cambio en el momento en la columna a lo largo de la altura de conexión.

Sistemas estructurales

A continuación se presentan los distintos sistemas estructurales mixtos cubiertos por las disposiciones sísmicas AISC [3], con los requisitos de diseño y limitaciones correspondientes para cada caso.

Marco Mixto semirrígido (C-PRMF)

Este sistema estructural está compuesto por columnas de acero y vigas mixtas, conectadas a través de uniones semirrígidas. Se espera que estos marcos desarrollen una cantidad significativa de deformación inelástica en las conexiones, con una cantidad limitada de inelasticidad en la base de las columnas. En el modelo de diseño debe considerarse la flexibilidad de las conexiones para obtener características dinámicas y derivas adecuadas.

Las columnas deben cumplir con los requisitos para columnas de acero de las disposiciones sísmicas, mientras las vigas deben ser no embebidas con adherencia perfecta con el hormigón.

La demanda sobre las conexiones debe determinarse considerando la flexibilidad de la conexión y posibles efectos de segundo orden. Adicionalmente, la conexión debe tener una capacidad no inferior al 50% de la capacidad nominal plástica de la viga, sin considerar el efecto del hormigón colaborante. Las conexiones deben ser capaces de acomodar una deriva de piso de 4%, demostrada experimentalmente.

Marco Especial Mixto rígido (C-SMF)

Este sistema estructural mixto puede estar compuesto por columnas de hormigón armado o mixtas y vigas de acero o mixtas. Se espera que un marco C-SMF desarrolle una cantidad significativa de deformación inelástica al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño. La mayor parte de esta deformación inelástica tiene lugar en los extremos de las vigas, a través de la formación de rótulas.

Las columnas mixtas deben cumplir los requisitos descritos más arriba para sistemas especiales, mientras que la de hormigón armado deben cumplir con el Capítulo 21 de ACI 318-05 [1], a excepción de la Sección 21.10.

Las vigas tienen limitaciones para la distancia entre la fibra más comprimida del hormigón y el eje neutro plástico de la sección de acero, y sus alas deben ser sísmicamente compactas, excepto cuando están embebidas en hormigón con un espesor de al menos 50 [mm] confinado adecuadamente por estribos.

Las conexiones deben ser diseñadas para resistir la demanda esperada de las vigas, incluyéndolos efectos de sobrerresistencia del material y endurecimiento por deformación. Debe demostrarse experimentalmente que la conexión es capaz de acomodar una deriva de piso del 4%.

Debe cumplirse el criterio de viga débil/columna fuerte, con las modificaciones adecuadas en las condiciones asociadas al uso de columnas o vigas mixtas.

Marco Intermedio Mixto rígido (C-IMF)

Este sistema estructural mixto puede estar compuesto por columnas de hormigón armado o mixtas y vigas de acero o mixtas. Se espera que un marco C-IMF desarrolle

en sus miembros y conexiones, una cantidad moderada de deformación inelástica al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño, la que se concentrará principalmente en las vigas.

Las columnas mixtas deben cumplir los requisitos descritos más arriba para sistemas intermedios, mientras que la de hormigón armado deben cumplir con la Sección 21.12 del Capítulo 21 de ACI 318-05 [1].

Las vigas no necesitan cumplir los requisitos de compacidad sísmica.

Las conexiones viga/columna deben ser capaces de acomodar una deriva entre pisos de al menos 3%, demostrada experimentalmente. La capacidad de la conexión debe determinarse en función de la plastificación de las vigas en una zona adyacente a la conexión.

Marco Corriente Mixto rígido (C-OMF)

Este sistema estructural mixto puede estar compuesto por columnas de hormigón armado o mixtas y vigas de acero o mixtas. Se espera que un marco C-OMF desarrolle, en sus miembros y conexiones, una cantidad limitada de deformación inelástica al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño.

Las columnas mixtas deben cumplir los requisitos descritos más arriba para sistemas corrientes, mientras que las de hormigón armado deben cumplir con ACI 318-05 [1], exceptuando el Capítulo 21.

Las vigas no necesitan cumplir los requisitos de compacidad sísmica.

Las conexiones viga-columna no necesitan cumplir requisitos particulares de detallamiento sísmico.

Marcos Mixtos Especiales Arriostrados Concéntricamente (C-CBF)

Este sistema estructural mixto puede estar compuesto por columnas de hormigón armado, acero o mixtas, vigas de acero o mixtas, y arriostramientos de acero o mixtos. Se espera que un marco C-CBF desarrolle una cantidad significativa de deformación inelástica al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño, proveniente principalmente de la fluencia en tracción y el pandeo en compresión de los arriostramientos.

Las columnas de acero deben cumplir con los requisitos para columnas en marcos especiales de acero arriostrados concéntricamente. Las columnas mixtas deben cumplir los requisitos descritos más arriba para sistemas especiales, mientras que la de hormigón armado deben cumplir con el Capítulo 21 de ACI 318-05 [1].

Las vigas deben cumplir con los requisitos para vigas en marcos de acero especiales arriostrados concéntricamente.

Los arriostramientos de acero deben cumplir con los requisitos para arriostramientos en marcos de acero especiales arriostrados concéntricamente. Los arriostramientos mixtos deben cumplir con los mismos requisitos que las columnas mixtas en este tipo de sistemas.

Las conexiones de los arriostramientos deben cumplir con los requisitos para marcos de acero especiales arriostrados concéntricamente.

Marcos Mixtos Corrientes Arriostrados Concéntricamente (C-Obf)

Este sistema estructural mixto puede estar compuesto por columnas de hormigón armado o mixtas, vigas de acero o mixtas, y arriostramientos de acero o mixtos. Se

espera que un marco tipo C-OBF desarrolle una cantidad limitada de deformación inelástica en sus miembros y conexiones al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño.

Las columnas mixtas deben cumplir los requisitos para sistemas corrientes, presentados más arriba. Las columnas de hormigón armado deben cumplir con ACI 318-05 [1], exceptuando el Capítulo 21.

Las vigas no necesitan cumplir los requisitos de compacidad sísmica.

Los arriostramientos de acero deben cumplir con los requisitos de la especificación AISC [4]. Los arriostramientos mixtos deben cumplir con los mismos requisitos que las columnas mixtas en este tipo de sistemas.

Las conexiones no necesitan cumplir requisitos particulares de detallamiento sísmico.

Marcos Mixtos Arriostrados Excéntricamente (C-EBF)

Este sistema estructural mixto puede estar compuesto por columnas de hormigón armado o mixtas, vigas de acero y arriostramientos de acero. Se espera que un marco C-EBF desarrolle una cantidad significativa de deformación inelástica solamente en la *viga de acople* al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño. Los arriostramientos diagonales, columnas y segmentos de viga ubicados fuera de la zona de la *viga de acople* se diseñan para permanecer esencialmente en el rango elástico.

Las columnas mixtas deben cumplir los requisitos para sistemas especiales, presentados más arriba. Las columnas de hormigón armado deben cumplir con el Capítulo 21 de ACI 318-05 [1]. Adicionalmente, cuando una viga de acople está adyacente a una columna de hormigón armado o una columna de acero embebida en hormigón, se debe proveer refuerzo transversal que cumpla los requisitos de la Sección 21.4.4 de ACI 318-05 [1] o los requisitos para columnas de acero embebidas presentados más arriba, respectivamente.

Las vigas de acople deben cumplir con los requisitos para vigas de acople en marcos de acero arriostrados excéntricamente de estas disposiciones. Es posible embeber la viga en hormigón fuera de la zona de la viga de acople.

Los arriostramientos deben cumplir los requisitos para arriostramientos en marcos de acero arriostrados excéntricamente de estas disposiciones. Lo mismo vale para las conexiones.

Muros Corrientes de hormigón armado con elementos de acero estructural (C-ORCW)

Este sistema estructural consiste en muros de hormigón armado que actúan en conjunto con elementos de acero estructural. Ejemplos de estos sistemas son muros de hormigón armado confinados por vigas y columnas de acero estructural o mixtas, o muros de hormigón armado acoplados por vigas de acero.

Los muros de hormigón armado deben cumplir con ACI 318-05 [1], exceptuando el Capítulo 21.

Cuando se usan elementos de borde de acero estructural, estos no necesitan cumplir requisitos de detallamiento sísmico. La demanda axial sobre estos elementos se determina suponiendo que el muro de hormigón se lleva todo el corte y el momento y las cargas gravitacionales se reparten entre el muro y los elementos de borde.

Cuando se usan columnas de acero embebidas en hormigón como elementos de borde, el diseño se hace considerando la sección transformada de hormigón usando

propiedades elásticas. Si el elemento de borde califica como columna mixta, debe cumplir con los requisitos para sistemas corrientes. Alternativamente puede ser diseñado de acuerdo a los requisitos de la Sección 10.16 de ACI 318-05 [1] en conjunto con los del Capítulo I de la especificación AISC [4].

Las vigas de acoplamiento de acero deben estar embebidas en los muros de hormigón una longitud suficiente como para resistir las fuerzas generadas por la resistencia nominal al corte y a la flexión de la viga de acople. La longitud embebida empieza al interior de la primera capa de refuerzo longitudinal del muro. Se debe poner refuerzo vertical en la zona embebida con capacidad nominal igual a la capacidad nominal a corte de la viga, el que debe estar adecuadamente desarrollado. Vigas de acople de acero embebidas en hormigón pueden ser usadas también, si cumplen con los requisitos para vigas de acople de acero, considerando la capacidad al corte de la viga de acople como la capacidad de la sección mixta.

Muros Especiales de hormigón armado con elementos de acero estructural (C-SRCW)

Este sistema estructural es similar al anterior, pero en este caso, sus componentes (muros de hormigón armado, elementos de borde de acero o mixtos, vigas de acople de acero o mixtas) deben cumplir con los requisitos de detallamiento para sistemas especiales y el Capítulo 21 de ACI 318-05 [1], para el caso de los muros de hormigón armado. El objetivo es lograr un sistema que tenga una capacidad de deformación inelástica significativa.

Muros de Corte de Placas de Acero embebidas en hormigón (C-SPW)

Este sistema estructural consiste en muros de placa de acero revestida con hormigón en uno o ambos lados, rodeados por elementos de borde de acero o mixtos. Se espera que una estructura tipo SPSW desarrolle una cantidad significativa de deformación inelástica de corte en las placas al ser sometido a fuerzas que resultan al considerar el sismo de diseño. La placa debe ser adecuadamente atiesada y confinada y conectada continuamente a los elementos de borde. Los elementos de borde horizontales y verticales se diseñan para permanecer esencialmente en el rango elástico.

Conclusión

Se han presentado los aspectos más relevantes del diseño sismorresistente de sistemas estructurales mixtos, basándose en las disposiciones de dos normas de amplio uso en América.

En general, estas normas reconocen que los sistemas estructurales mixtos pueden tener un comportamiento igualmente dúctil que los sistemas convencionales de acero u hormigón armado, siempre que se tenga cuidado en hacer un detallamiento adecuado de los elementos y las conexiones.

Referencias

1. ACI (2005), "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario", ACI318-05, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

2. AISC (1997). "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
3. AISC (2005a). "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
4. AISC (2005b). "ANSI/AISC 360-05. Specification for Structural Steel Buildings," American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
5. ASCE (2005). "ASCE/ SEI 7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
6. Fahnestock, L.A., Sause, R., Ricles, J.M. (2007). "Seismic Response and Performance of Buckling-Restrained Braced Frames," *Journal of Structural Engineering ASCE*, 133(9): 1195–1204.
7. Herrera R.A., Ricles J.M., Sause R. (2008), "Seismic performance evaluation of a large-scale composite MRF using pseudodynamic testing," *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 134(2): 279-288.
8. Tsai, K.C., Hsiao, B.C., Lai, J.W., Chen, C.H., Lin, M.L. y Weng, Y.T. (2003), "Pseudodynamic experimental responses of a full-scale CFT/BRB composite frame," Joint NCREE/JRC Workshop on "International Collaboration on Earthquake Disaster Mitigation Research (Methodologies, Facilities, Projects and Networking)", November 17-20, 2003, NCREE, Taipei, Taiwan.