

c.- Disipación de Energía

Según esta filosofía, el edificio es calculado para que resista en el rango elástico, unas fuerzas muy inferiores a las correspondientes al sismo de diseño, y, para el caso de ocurrir un sismo mayor, su energía será disipada. La forma de disipar energía podría ser por rozamiento o por deformación inelástica, entre otras.

DISIPACION DE ENERGIA POR ROZAMIENTO

Se colocan celosías metálicas verticales en algunos de los vanos, conformadas con diagonales en X, no conectadas rígidamente en su intersección, sino apretadas por un sistema de placas acuñaadas, de forma que durante un sismo fuerte, al empezar el movimiento, se apretaría la cuña, y por rozamiento se disipa la energía del sismo. Luego del sismo se puede reajustar el acuñaado. El sistema de placas de rozamiento es algo costoso pero efectivo.

DISIPACION DE ENERGIA POR DEFORMACION INELASTICA

Es en parte, la filosofía que ha adoptado la mayoría de códigos, y por ende la más utilizada actualmente. Para disipar la energía de esta manera, en el caso de edificios de concreto armado, se cuenta con la formación de rótulas plásticas en las vigas, que se inician al agotarse su capacidad elástica en flexión, y continúan con la rotación inelástica de acuerdo a la demanda de disipación de energía. En este proceso tienen lugar grandes deformaciones del refuerzo en tensión, y del concreto en compresión.

Esto quiere decir que las vigas se deben agotar en flexión, antes que ocurra cualquiera otra forma de falla en las propias vigas, en los nudos o en las columnas. La formación de rótulas plásticas implica la aparición de fisuras, es decir que se prevé una afectación estructural en caso de sismo fuerte.

FUERZAS ESTATICAS EQUIVALENTES AL CODIGO UBC

Actualmente el código UBC usa como sismo de diseño uno que ocasiona una aceleración máxima del suelo de 0.4 g., que produce en un edificio unas fuerzas del orden del 40% al 60%

del peso del edificio. Sin embargo, las fuerzas típicas que se obtienen con dicho código están alrededor de 0.1 del peso del edificio. Cómo puede ser esto posible?

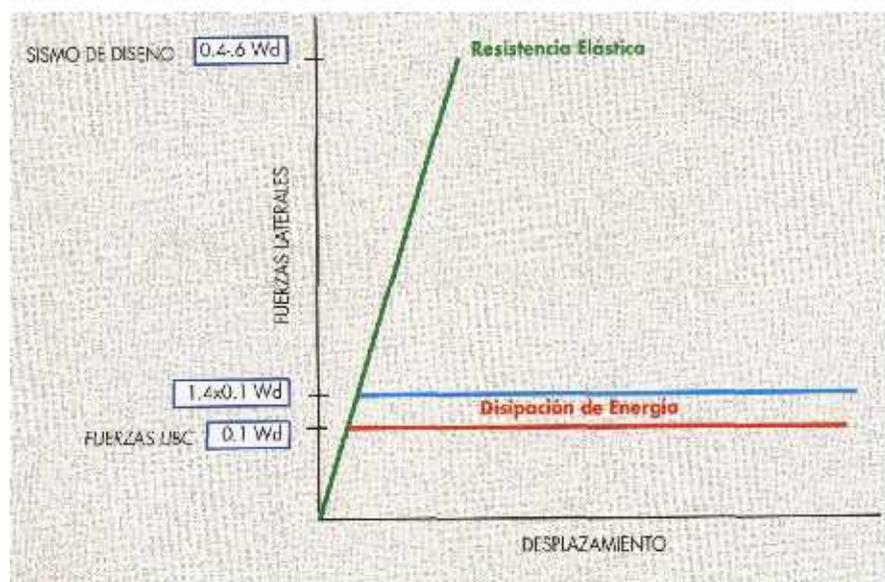


FIG. 1. Visión simplificada de las filosofías de diseño



Pues simplemente, siguiendo la filosofía antes indicada, y para el caso de edificios de hormigón armado, el código exige que para esas fuerzas laterales cercanas al 10% del peso del edificio, éste se comporte y resista elásticamente, es decir que todos sus miembros tengan una resistencia, dada por su sección, materiales y armado, igual o mayor que la que produce dicha carga, aumentada al incluir los factores de mayoración, que son similares a 1.4. Para cargas mayores, la estructura ya no tiene la resistencia suficiente, y la forma de enfrentarlas es disipando energía por deformación inelástica. Por tanto, de ocurrir el sismo fuerte, es decir el de diseño, se agotará la resistencia o capacidad de varias vigas, empezarán a fluir dichas vigas, se formarán allí las rótulas plásticas, y se disipará la energía necesaria, evitando el colapso del edificio. Desde luego, éste es el objetivo, y su cumplimiento no es automático, sino que se debe realizar el diseño y verificación respectiva para conseguir el objetivo.

Entonces, las fuerzas laterales que se obtienen con el código, tienen una doble interpretación

1. Fuerzas pequeñas reales correspondientes a un sismo pequeño: Para sismos que produzcan hasta fuerzas similares al 10% del peso del edificio, es decir sismos bajos pero frecuentes, la estructura debe tener una resistencia y rigidez para

que se mantenga en el rango elástico, y por tanto no haya fisuras de cedencia en ningún miembro estructural, ni tampoco fisuras en las paredes. No se requiere ductilidad para estos niveles de carga.

2. Fuerzas pequeñas rebajadas por ductilidad: Para sismos fuertes, que podrían producir fuerzas laterales 4-6 veces las anteriores, el código permite analizar la estructura con un corte basal del orden del 10%, pues este nivel bajo de fuerzas corresponde al espectro de diseño de un sismo aito, pero reducido por comportamiento inelástico. Sin embargo esta gran "rebaja" no es gratuita: Para poder hacer frente a un sismo fuerte, usando sólo fuerzas pequeñas, es obligatorio verificar que se pueda disipar la energía mediante la fluencia del refuerzo longitudinal de las vigas, durante su rotación inelástica. Para sobrepasar la resistencia elástica, la ductilidad es indispensable, y sobre todo, el que la viga en flexión sea más débil que el resto de posibles fallas.

Debe por tanto quedar claro que las fuerzas laterales del código son muy inferiores a las que corresponden al sismo de diseño, y por tanto, el diseñador debe tener la seguridad de que la estructura va a ser agotada de una manera adecuada, es decir a través de la cedencia de las vigas

ETAPAS DE DISEÑO

Para el caso de edificios de hormigón armado, el diseño sismorresistente tiene que ser realizado en dos etapas:

I RESISTENCIA ELÁSTICA

Analizar la estructura, solicitada con las cargas verticales muerta y viva, más las fuerzas del código (alrededor del 10% del peso del edificio) o un espectro equivalente, y encontrar el refuerzo longitudinal requerido en todos los elementos, para que resista dichas cargas actuantes

II DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR FLUENCIA DE VIGAS

Obtener el refuerzo transversal en vigas, columnas y nudos, en base a la carga vertical presente,

y en función de la capacidad a flexión del elemento respectivo. Verificar que cuando el sismo de diseño agote la capacidad elástica del edificio, dada por el refuerzo longitudinal proporcionado, se puedan presentar rótulas plásticas en las vigas, es decir puedan fluir las vigas, y así disipar energía. De no realizar esta verificación, sólo se estaría garantizando que la estructura puede resistir sismos pequeños, pero no el sismo de diseño, que, como ya se ha dicho, es mucho mayor

Una etapa intermedia consiste en verificar que la deriva o distorsiones de piso estén dentro de los límites admitidos por los códigos. Más adelante se explican las razones.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS DE LOS EDIFICIOS DE BAHÍA



En Bahía, un edificio colapsó, unos pocos tuvieron afectaciones estructurales graves, y muchos se afectaron en sus mamposterías. De los estudios realizados sobre varios de estos edificios, se encuentra que, aparte de problemas específicos de cada uno, el común denominador es que se realizó la etapa I del diseño, pero no las otras dos etapas. En efecto, el refuerzo longitudinal requerido en vigas y columnas es en general aceptable, es decir que los edificios fueron calculados y diseñados para que resistan las fuerzas del código, pero no estaban aptos para hacer frente al sismo de diseño, pues no tenían las condiciones para incursionar en el rango inelástico. Los extensos daños en mamposterías reflejan que tampoco fue realizada la etapa intermedia de revisión de distorsiones

máximas.

En realidad, en el caso de los edificios de Bahía, incluso en la etapa I hubo ya algunos contratiempos, pues tenían algunas de las características siguientes: grandes luces, sistemas de entrepiso unidireccionales, vigas banda, pocas o ninguna pared estructural de concreto, grandes volados, paredes sueltas, excesivo peso de paredes, concentración de masas y rigideces, que daban una estructura pesada y muy flexible; el resultado esperado fue el generalizado daño de paredes. También hubo casos de pisos blandos, columnas cortas, y/o torsión en planta, que impiden la traslación armoniosa del edificio y su comportamiento predominante en flexión.

En los edificios que tuvieron daños en paredes y no daños estructurales, y que por tanto no había síntomas de fluencia en sus miembros, se puede afirmar que el edificio se mantuvo en el rango elástico, y que las fuerzas que se generaron no superaron el valor de 1.4 - 1.5 del peso del edificio, en base al coeficiente sísmico utilizado de 0.95 multiplicado por el factor de mayoración de 1.4. De superarse esta capacidad elástica, seguramente hubiera habido varios colapsos más.

RESUMEN DE RECOMENDACIONES DE DISEÑO SISMORRESISTENTE

Las recomendaciones que se encuentran en la literatura, respecto a que las estructuras sean simétricas en planta y en elevación, sin concentrar masas ni rigideces ni en planta ni en elevación, evitar pisos blandos, columnas cortas, etc., tienen que ver casi exclusivamente con la etapa II, es decir, están buscando facilitar que la estructura pueda incursionar en el rango inelástico sin muchos contratiempos. Para la etapa I, aparentemente no hay ningún problema, todo es calcula-

ble con los modernos programas de computación. Sin embargo, teniendo en cuenta que el sismo de diseño es mucho mayor que las fuerzas del código, y por consiguiente la estructura será infaliblemente superada su capacidad elástica, es imperativo revisar que efectivamente sean las vigas las que fluyan por flexión.

Para ello se requiere que se cumpla lo siguiente:

Etapa I

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Modelando la estructura en la forma más realista posible, y utilizando unas fuerzas del código que tomen en cuenta el sistema estructural, las condiciones del suelo, y las características sísmológicas de la zona, se debe realizar el análisis estructural de forma tridimensional. Para la mayoría de casos, el análisis estático puede ser suficiente. Los análisis modal espectral y dinámico deben ser hechos en casos de estructuras especialmente altas o irregulares, pero siempre después de haber hecho el análisis estático. En los tres casos de análisis, con los programas comer-

ciales como SAP90, SAP2000, ETABS, SUPER ETABS, ANSYS, etc., se realiza un análisis lineal y elástico, de tal suerte que sólo es hasta el nivel de fuerzas del código y factores de seguridad. Ver figura 1, y nada dicen sobre la parte de comportamiento inelástico. Por tanto, no necesariamente es más sismorresistente un edificio calculado con análisis modal espectral. En principio, con valores equiparables de fuerzas estáticas y espectro de diseño, los resultados deben ser muy parecidos, al hacer el análisis estático o el modal espectral.

El comportamiento inelástico y disipación de energía se consigue mediante la fluencia de las varillas longitudinales de las vigas, al agotarse su capacidad a flexión. Esto implica un movimiento traslacional de los pórticos, de tal suerte que la flexión sea el comportamiento predominante. Si un edificio tiene su comportamiento dinámico predominante en torsión, se producirá torsión importante en la mayoría de elementos columna, y pueden tener problema para incursionar en el rango inelástico por las características frágiles del fenómeno de la torsión.

COMPORTAMIENTO DINAMICO TRASLACIONAL

Examinando los porcentajes de Masa Modal Efectiva, se puede encontrar la participación de los modos traslacionales o en torsión. Los dos primeros modos de vibración deben ser traslacionales, y el tercero puede ser torsión. En caso de que en torsión sea el primero o segundo modo de vibración, hay que reestructurar el edificio, tratando de equilibrar las rigideces laterales, hasta que la torsión pase al tercer modo.

DISTORSIONES DE PISO DENTRO DE LOS LIMITES

La distorsión de piso es la relación entre el desplazamiento lateral neto del piso, y su altura. Es lo mismo que la deriva entre la altura del piso. En la Modelación se debe utilizar la inercia agrietada de las vigas, y si se trata de edificios con vigas banda, utilizar un ancho efectivo de pórtico no mayor a $1/3$ del ancho del pórtico. Esta revisión debe ser hecha piso por piso, como lo especifica el código, adicional al análisis de distorsión global del edificio. El límite aceptado por los códigos depende del sistema estructural y del uso que tendrá la estructura. Aproximadamente está alrededor de 0.004 para edificios comunes, aunque lo conveniente es mantenerse por debajo de 0.0025. Las paredes admiten diverso

valor de distorsión, dependiendo de su constitución y sobre todo de su geometría, pero se pueden dañar con distorsiones de 0.001 a 0.0025.

La revisión de distorsión de piso se la hace principalmente para controlar el daño de paredes, pero además sirve para reducir la degradación del hormigón en cada ciclo histerético, por la naturaleza reversible del sismo, para mantener el desplazamiento lateral total en niveles que no causen pánico excesivo ni pérdida generalizada de bienes, y para alejarse de problemas de inestabilidad global por el efecto P-Delta. Al igual que en el caso anterior, si no cumple la revisión, se debe rigidizar el edificio, hasta que cumpla.

DISEÑO DEL REFUERZO

Una vez verificadas las dos primeras condiciones, se puede emprender en el diseño de columnas, vigas, losa y cimentación. Para ello se debe seguir los procedimientos de diseño conocidos. Vale la pena mencionar que en el caso de las columnas, la carga axial actuante debe estar por debajo de la carga balanceada, para que se pueda contar con ductilidad. Esto es sobretodo cierto e indispensable en las columnas del primer piso, donde se puede anticipar la formación de una rótula plástica. El tamaño grande de dicho elemento es importante, pues la revisión posterior de las conexiones viga - columna o losa - columna será más favorable.

En el caso de las vigas, el asunto de ductilidad es vital pues toda la energía de disipación se concentra en estos elementos. En primer lugar, el refuerzo debe ser mayor al mínimo y menor que el máximo. Si bien el código ACI permite como acero máximo una cuantía de 2.5%, y si se coloca esta gran cantidad de

acero en tensión junto con otra gran cantidad de acero en compresión, la sección va a ser dúctil ciertamente, pero el resultado final puede ser un total fracaso, pues si el objetivo es hacer que fluya la viga, mientras más acero exista, más difícil será lograrlo, porque una parte del diseño de las conexiones viga - columna o losa columna, consiste en verificar que la sollicitación a corte o a punzonamiento sea inferior a su respectiva capacidad. Pero dicha sollicitación depende de la cantidad de acero existente superior e inferior, y será muy difícil que cumpla con tanto acero. Esto significa que al intentar fluir el refuerzo longitudinal, antes se agotará en corte o en punzonamiento. Es decir que en cuanto a comportamiento estructural, la mejor viga es la que menos acero tenga en tensión (siempre que sea mayor al mínimo), pues somete a menores esfuerzos al hormigón comprimido. Hay que recordar que la poca habilidad que tiene el hormigón para deformarse en compresión, es la enemiga número uno de la ductilidad.

Etapa II

DISEÑO DE ESTRIBOS EN VIGAS

El objetivo es que la viga fluya en flexión cuando se incrementen los momentos en el caso de un sismo fuerte. Si antes la viga se agota en corte, todos los cuidados del diseño habrán sido en vano. La falla en corte es la primera y más importante causa de que la viga se vea imposibilitada de fluir. Para evitar dicho problema, el cortante hiperestático de diseño debe ser obtenido no por cálculo, sino en base a la capacidad real a flexión de la viga, tomando en cuenta el endurecimiento del acero y los aceros que están en la losa cerca de la viga. A él se suma el corte isostático. Si el cortante hiperestático supera al isostático, la contribución del concreto para resistir el cortante es nula. El

confinamiento se controla con el espaciamiento a $d/4$, y ese diseño debe mantenerse en una longitud de 2 veces el peralte de la viga. En edificios de 3 pisos en adelante, usar estribos de 10 mm. Esto se aclara puesto que mientras que en el código ACI 318-71 a 95, el diámetro mínimo de estribo es el # 3 (9.52 mm), el Código Ecuatoriano de la Construcción especifica únicamente # 8, sin mostrar respaldo experimental o teórico. Para la tipología de casas unifamiliares de 1 y dos pisos en nuestro medio, parece suficiente usar estribos de 8 mm como mínimo. Ciertas edificaciones industriales de 1 y 2 pisos, con grandes luces o cargas, pueden requerir estribos de 10 mm.

DISEÑO DE ESTRIBOS EN COLUMNAS

Los estribos en columnas se los obtiene como el mayor entre lo que se requiere para corte y para confinamiento. Con el mismo criterio del numeral anterior, el corte actuante, que sólo es hiperestático, y por tanto constante en toda la altura de la columna, debe ser obtenido en base a la capacidad a flexión máxima de la columna, la cual normalmente es el momento balan-

ceado. En los esquemas debe indicarse claramente que los estribos tengan sus ganchos a 135 grados, es decir bien embebidos en el corazón confinado de la columna. Si los ganchos están simplemente doblados a 90 grados y por tanto anclados en el recubrimiento, es lo mismo que no existieran para confinamiento, y para corte tendrán una efectividad menor a la mitad.



DISEÑO DE LA CONEXION VIGA - COLUMNA

Esto es aplicable a estructuras aporticadas, compuestas por columnas y vigas descolgadas.

El tener unas vigas y unas columnas dúctiles es una condición necesaria pero no suficiente para que las vigas puedan fluir. Es necesario que la viga en flexión sea más débil que la columna y que al tratar de fluir, no se rompa el nudo. Por tanto, hay que verificar que se cumplan las dos siguientes condiciones

Para lo primero, la capacidad a flexión

de las columnas debe ser mayor que 1.4 veces la capacidad a flexión de las vigas.

Para que el nudo sea más fuerte que la viga, se requiere asegurar que no falle en corte cuando los aceros de la viga entren en cedencia. Mientras más acero superior e inferior exista en la conexión, más difícil será hacerlos fluir. También se necesita colocar refuerzo de confinamiento en el nudo. El deterioro de la adherencia en nudos interiores, y el problema de anclaje en los exteriores, es algo que se debe revisar. El acero no puede fluir si falla por adherencia o anclaje.

DISEÑO DE LA CONEXION LOSA - COLUMNA

Esto es aplicable a los edificios compuestos por columnas y losas con vigas banda.

El objetivo es similar, es decir verificar que la viga banda y algo de la losa entren en fluencia. Para ello se requiere que se cumplan las siguientes dos condiciones:

COLUMNA FUERTE - VIGA BANDA DÉBIL

VIGA BANDA FUERTE EN PUNZONAMIENTO
- VIGA BANDA DÉBIL EN FLEXION

Lo primero es idéntico a lo indicado en el numeral anterior.

Respecto de lo segundo, es de primordial importancia, pues aunque los sistemas estructurales compuestos por columnas y losas con vigas banda estén proscritos en la mayoría de códigos, y por tanto no hay un procedimiento claro en el código, en nuestro medio es el sistema que más se usa. Es excelente para carga vertical pero nefasto para cargas sísmicas. Es muy difícil e impracticable prohibirlo aquí, de suerte que

más bien se presentó un proceso de diseño para tales sistemas, en las XI Jornadas de Ingeniería Estructural, en Guayaquil, oct 97, el mismo que es auto limitante, es decir que si no pasa en cierto punto del proceso, no se insiste sino que hay que reestructurar el edificio.

El proceso comprende el diseño de estribos para punzonamiento. El punzonamiento se lo encuentra en base a la capacidad a flexión de las vigas banda. Es decir que si se desea que ellas fluyan, entonces hay que verificar que en su intento no ocasionen fallas de punzonamiento en las vigas banda.

De paso conviene aclarar, que las vigas banda no modifican el comportamiento de una losa plana, y que al diseñar los estribos de las vigas banda como vigas de pórtico, se está colocando menos de la mitad de estribos requeridos por punzonamiento. Los sistemas de entrepiso en una sola dirección combinados con vigas banda, agravan tremendamente el problema





DISEÑO DEL REFUERZO A CORTE DE LOS DIAFRAGMAS

Esto es aplicable a estructuras con diafragmas, aislados o acoplados. Son los edificios más confiables para sismos.

El objetivo es asegurarse que los diafragmas puedan fluir en su base, al agotarse su capacidad a flexión. El código ACI no indica un proceso claro ni conveniente para conseguir ese objetivo. El corte de diseño debe ser obtenido en base a la capacidad a flexión. La

capacidad a flexión, a su vez, debe ser obtenida en un diagrama de interacción adecuado.

De haber vigas de acople, y si éstas tienen un aspecto largo a alto menor a 2, el refuerzo debe ser diagonal, y no el convencional longitudinal + transversal. El ACI no contempla en el código tal diseño pero se lo encuentra en publicaciones de Nueva Zelanda.

RESUMEN DE REQUISITOS

Al principio se propuso como resumen, que en pocas palabras, el diseño sismorresistente consiste en verificar que la viga fluya. Las condiciones para que ello suceda no son pocas. Tales condiciones son las siguientes:

Para una estructura aporticada:

1. Que la viga no falle en corte
2. Que el armado de la viga supere al mínimo
3. Que el armado de la viga no se acerque al máximo
4. Que la columna no falle en corte
5. Que la columna no falle por falta de refuerzo de confinamiento
6. Que la carga axial de la columna sea inferior a la balanceada
7. Que la capacidad a flexión de las columnas supere ampliamente a las de las vigas
8. Que el nudo no falle en corte
9. Que el nudo no falle por falta de refuerzo de confinamiento
10. Que en el nudo no se pierda la adherencia de las varillas de la viga
11. Que no falle el anclaje de las varillas de la viga en columnas exteriores

Para una estructura con losas con vigas banda:

- 1 a 7 se repite de las aporticadas.
8. Que el esfuerzo de punzonamiento actuante no supere el admisible
9. Que los estribos sean obtenidos para punzonamiento por capacidad.

CONCLUSIONES

La revisión de los diseños de varios edificios de Bahía, afectados por el sismo del 4 de agosto de 1998, en su mayoría aporticados, indica que el diseño estructural fue incompleto, pues se realizó la etapa I en forma aceptable, pero se encontró que no fue revisada la etapa II ni tampoco la intermedia. Si a esto se suma que al revisar otros diseños de edificios en Quito la situación es similar, el panorama que se espera en caso de un sis-

mo que sobrepase la resistencia elástica, es sombrío. El tan esperado nuevo código de la construcción, en la parte correspondiente a diseño de hormigón armado, dará nuevas luces en el diseño de edificios con losas con vigas banda, así como también con los que tengan diafragmas, pero muy pocas novedades con respecto a los aporticados, lo que quiere decir que para todos los edificios aporticados se debió haber utilizado el código vigente

Paralelamente con la edición del código, será necesario hacer una campaña de concientización, para instruir sobre lo peligroso que resulta el no diseñar con provisiones sismorresistentes, y como utilizar las recomendaciones del código, seguramente con ejemplos y explicaciones sencillas. Adicionalmente y junto con los municipios crear los mecanismos de control para que se cumpla con el código, y se haga un diseño más seguro

