

Caracterización del comportamiento de elementos no estructurales ante sismos de moderada a gran intensidad

Yelena Berenguer-Heredia^{*(1)}, Grisel Morejón-Blanco ⁽¹⁾ y Kenia Leyva-Chang ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Calle 17 No.61 e/4 y 6, Vista Alegre, Santiago de Cuba, Cuba.
E-mail: yelena@cenais.cu

Recibido: octubre 23, 2013	Aceptado: julio 7, 2014
----------------------------	-------------------------

Resumen

En el trabajo se presenta un análisis de la influencia que pueden tener sismos de moderada a gran intensidad sobre los elementos no estructurales a fin de mejorar el comportamiento de estos y su influencia en la vulnerabilidad de la edificación. Se realiza un estudio del desempeño que han tenido estos elementos en sismos pasados y se hace una revisión crítica de cómo los códigos sismorresistentes de países con mayor desarrollo en la Ingeniería Sísmica tratan su diseño. Como principal resultado de la investigación se tiene que por la importancia que reviste la protección de estos elementos en zonas de moderada a alta peligrosidad sísmica, es necesario incorporar en la norma de diseño sismo resistente cubana, aspectos que permitan un diseño adecuado de los elementos no estructurales.

Palabras claves: elementos no estructurales, códigos sismorresistentes

Characterization of the behavior of non-structural elements in case of earthquakes of moderate to high intensity

Abstract

The paper presents an analysis of the influence that can have earthquakes of moderate to high intensity on non-structural elements in order to improve the behavior of these and its influence on the vulnerability of the building. A study of performance that have these elements in past earthquakes and becomes a critical review of how codes seismic of countries with more development in seismic engineering treat your design. The main result of this research is that is necessary to incorporate in the Cuban code, design aspects that allow proper design of nonstructural elements because of the importance of protect these elements in areas of moderate or high seismic hazard.

Key words: non-structural elements, seismic code

1. Introducción

La vulnerabilidad de una instalación depende del comportamiento que tengan todos los elementos que la compongan por lo que a la hora de realizar un estudio detallado debe revisarse la estructura, que es el conjunto de elementos que garantizan que el edificio permanezca en pie tales como cimientos, vigas, columnas entre otros y los elementos no estructurales los cuales se apoyan en la estructura y se dividen en elementos arquitectónicos (tabiques divisorios, ventanas, falsos techos), líneas vitales (redes de telecomunicaciones, gas, agua) y equipamiento existente.

El desarrollo de la ingeniería ha permitido disminuir la probabilidad de que una estructura colapse parcial o totalmente. A pesar de esto las pérdidas económicas provocadas por la ocurrencia de los eventos sísmicos siguen siendo graves. Esto se debe principalmente a que el costo de la estructura cuando esta alberga instalaciones esenciales está entre un 10 y un 15% del costo total de la obra. Así las pérdidas económicas en estos casos radican en el daño no estructural y en la pérdida y recuperación de servicios.

En todas las edificaciones existe una relación estrecha entre los elementos estructurales y los no estructurales, siendo así que es común encontrar fachadas arquitectónicas que modifican sustancialmente el comportamiento estructural esperado, generando columnas cortas o fallas frágiles no anticipadas de los elementos no estructurales. Por esto es imprescindible considerar los aspectos no estructurales en la evaluación de la vulnerabilidad general de la edificación.

Un movimiento sísmico de menor intensidad puede causar significativos daños no estructurales, sin afectar de manera importante a componentes estructurales. La experiencia ha demostrado que los efectos de segundo orden causados por daños en elementos no estructurales pueden agravar de forma significativa la situación. Por ejemplo, cielos rasos y acabados de paredes pueden caer sobre corredores o escaleras interrumpir la circulación; incendios, explosiones y escapes de sustancias químicas pueden ser peligrosos para la vida. Los daños o interrupción en los servicios básicos (agua, electricidad, comunicaciones, etc.) pueden hacer que una moderna instalación se convierta en una instalación virtualmente inútil porque su funcionamiento depende de ellos.

Sin embargo mientras que los aspectos relacionados con la vulnerabilidad estructural se discuten ampliamente, en cuanto a los aspectos no estructurales se evidencia que su protección sísmica raramente se lleva a cabo. En la práctica, al construir o rehabilitar una edificación el especialista en Ingeniería Sísmica si participa, trabaja solamente en la protección del sistema estructural. Los elementos estructurales se dejan en manos de profesionales no especializados en el tema y el equipamiento y mobiliario se le deja generalmente al cliente.

2. Resultados y discusión

2.1. Elementos no Estructurales. Principales características

Los elementos no estructurales se pueden clasificar en las categorías siguientes (OPS, 2000).

- Los elementos arquitectónicos: Incluyen componentes como: muros divisorios, paredes exteriores no portantes, ventanas, cielos rasos, sistema de alumbrado, etcétera.
- Los equipos y mobiliarios: Comprende elementos como equipos médicos, equipos mecánicos, muebles de oficina, recipientes de medicamentos, y otros.
- Las instalaciones básicas: Incluyen los sistemas de abastecimiento de servicios, tales como: electricidad, agua, vapor, gases médicos, comunicaciones, etcétera.

En la **Fig. 1** se puede observar una muestra de los elementos no estructurales que pueden encontrarse en edificaciones hospitalarias.



Fig. 1. Elementos no estructurales en instalaciones hospitalarias.

Estos elementos generalmente están ubicados a una determinada altura de la edificación por lo que no están expuestos directamente al movimiento del suelo generado por un sismo sino que están sometidos a la amplificación del movimiento generada por la respuesta dinámica de la estructura.

Su peso es ligero en comparación con el peso de la estructura en la que se encuentran ubicados y su rigidez es mucho menor que la de la estructura en su conjunto. Esto trae como resultado que sus frecuencias naturales estén cerca de las frecuencias naturales de la estructura por tanto la respuesta dinámica de sus soportes puede ser extraordinariamente alta.

Un estudio de vulnerabilidad no estructural busca determinar la susceptibilidad a daños que presentan estos elementos, los cuales pueden verse afectados por sismos moderados y, por tanto, más frecuentes durante la vida útil de la edificación; en cambio, los elementos estructurales se verán afectados frente a sismos severos y poco frecuentes. Debido a la alta probabilidad de ocurrencia de sismos moderados que pueden perjudicar a los elementos no estructurales, es preciso tomar las medidas necesarias para proteger estos elementos.

Los elementos arquitectónicos relacionados a continuación resultan ser los más sensibles a la deformación; por lo tanto, para lograr un nivel de seguridad que permita al menos la ocupación inmediata de la instalación después de un sismo, es indispensable tomar consideraciones especiales con dichos elementos (OPS, 2000).

- Muros no estructurales. Se define como muros no estructurales a las paredes de mampostería, u otro material, que sirvan con fines divisorios de espacios, soporten su propio peso, las cuales tienen una capacidad muy limitada para resistir las fuerzas laterales.
- Cielos rasos. Son elementos sensibles a las deformaciones y aceleraciones producidas por sismos. Las caídas masivas de los cielos rasos constituye una amenaza de posibles lesiones a los ocupantes de la instalación y puede provocar daños en equipos y bloquear rutas de circulación. Así mismo, se debe tener cuidado de que las lámparas, que forman parte de los cielos rasos, cuenten con un soporte independiente, de manera que si se produce la caída masiva de los paneles el sistema de iluminación pueda seguir funcionando.
- Ventanería. Los marcos anclados a la estructura o a los muros no estructurales, al ser sometidos a grandes deformaciones, se torcerán y sufrirán pandeo; esto provocará, en el caso de ventanería de cristal, que el vidrio se salga del marco y se quiebre.

2.2. Daños observados en elementos no estructurales

En los últimos años con la evolución de la ingeniería sísmica se ha logrado desarrollar, la mayoría de las veces después de terremotos destructivos, sistemas con baja probabilidad de colapso y daño controlado. Sin embargo la respuesta de las edificaciones no ha sido la deseada por la poca importancia que se le ha prestado a la influencia que tienen los elementos no estructurales en el funcionamiento de una edificación posterior a un evento sísmico,

especialmente las que deben permanecer prestando servicios luego de la ocurrencia de un sismo siendo la falla de los elementos no estructurales causa de la pérdida de funcionamiento de estas edificaciones.

A pesar de lo alarmante de las experiencias de sismos pasados, las reseñas de los daños no han sido objeto de especial atención por parte de los investigadores, razón por la cual es limitada la información disponible. A continuación se presenta una breve recopilación de daños observados en terremotos de magnitud moderada que han producido daños en elementos no estructurales:

- Terremoto de San Salvador, El Salvador, 1986 (magnitud 5.4): Más de una docena de edificaciones hospitalarias sufrieron daños o fueron afectadas, 10 instalaciones fueron desalojadas y se perdieron más de 2000 camas destinadas a la atención de emergencia sísmica
- Terremoto de El Pilar, Venezuela, 1986 (magnitud 5.9): Fisuración en tabiquería y separación tabique – columna en instalaciones escolares. Daños en la tabiquería del Hospital Central de Carúpano, el cual había sufrido daños no estructurales en sismos pasados.
- Terremoto de Umbria – Marche, Italia, 1997 (magnitud 5.8): Una sucesión de 5 eventos con magnitud similar al evento principal produjo daños no estructurales importantes en al menos una docena de hospitales de la región.
- Terremoto de Niquero, Granma, Cuba, 2007 (magnitud 5.0): Causó daños en los elementos no estructurales en zonas cercanas al epicentro, tales como: grietas pasantes en paredes, daños en ventanería de cristal y caída de cielos rasos.
- Terremotos de la zona de Baconao, Santiago de Cuba, Cuba (20 de marzo 2010 con magnitud 5.5 y 4 de octubre 2010 con magnitud 5.1), causaron daños en elementos no estructurales tales como: fisuras y grietas en paredes de edificaciones, que en algunas ocasiones fueron pasantes; grietas en uniones de elementos; caída de objetos en los niveles superiores de los edificios.

Generalmente, los daños no estructurales se deben a la unión inadecuada de los acabados, muros de relleno o divisorios y de las instalaciones con la estructura, o a la falta de rigidez de la misma, lo cual se traduce en excesivas deformaciones que no pueden ser absorbidas por estos elementos. Los daños no estructurales más comunes son el agrietamiento de elementos divisorios de mampostería, el aplastamiento de uniones entre la estructura y los elementos de relleno, el desprendimiento de acabados y otros componentes adosados y la rotura de vidrios y de instalaciones de diferente tipo.

En los muros de mampostería, que sirven de división o relleno, las sollicitaciones de cortante causan grietas diagonales usualmente en forma de X, que para el usuario de la edificación son dramáticas y pueden causar la inutilidad de la edificación (ver **Fig. 2**).



Fig. 2. Agrietamiento de muros de mampostería.

De casi todos los terremotos se pueden citar ejemplos de los efectos perjudiciales de los elementos no estructurales cuando actúan como elementos rígidos en la respuesta de la estructura, en particular cuando se trata de sistemas estructurales flexibles que contienen tabiques o muros que llenan parcial o totalmente con mampostería rígida de ladrillo el entramado de vigas y columnas. Estos muros son construidos luego de haberse desencofrado las columnas y vigas del pórtico, sin embargo no se aíslan del pórtico existente sino que se adhieren a él utilizando generalmente mortero. Los pórticos con tabiques de relleno se vuelven más rígidos una vez que la estructura hace contacto con el tabique de relleno, incrementando la rigidez y cambiando las propiedades dinámicas de la estructura. En caso que este tipo de muros de mampostería estén distribuidos de forma asimétrica adicionalmente pueden excitar modos de vibración, causando un comportamiento muy desfavorable de la estructura. Estos muros o tabiques se

resquebrajan de forma muy severa si no han sido diseñados para soportar las fuerzas de interacción con el pórtico en el momento del terremoto, e incluso pueden ocasionar un efecto muy nocivo, pues dichas fuerzas pueden causar también graves daños en el sistema aporticado.

Cuando se rellena parcialmente el espacio existente entre columnas, levantando muros desde el piso hasta el umbral de una ventana o abertura, pueden causarse daños severos en incluso colapsos, puesto que esta circunstancia genera el conocido efecto de la columna corta, en el cual la columna tiende a fallar en forma frágil, debido a que es solicitada por fuerzas cortantes elevadas, generadas por el impedimento a la deformación que le imponen los tabiques hasta cierta altura a la columna (ver **Fig. 3**).

Los cielos rasos han resultado ser particularmente vulnerables en caso de sismo, estos pueden caer sobre corredores o escaleras interrumpiendo la circulación y las actividades del área donde caiga (ver **Fig. 4**).

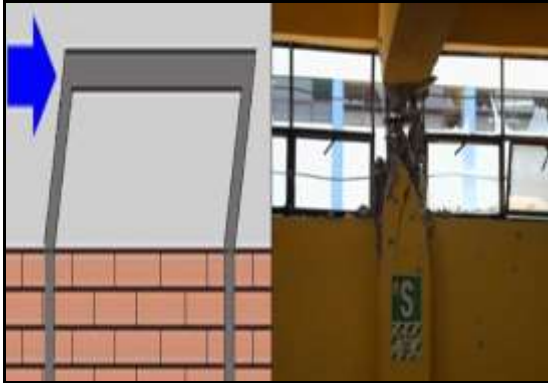


Fig. 3. Agrietamiento de muros de mampostería.



Fig. 4. Caída de cielos rasos.

La estantería y tuberías que albergan sustancias nocivas deben estar bien protegidas, pues en caso contrario pueden producirse derrames durante un sismo lo que puede ocasionar incendios, explosiones y derrames de sustancias químicas peligrosas para la vida (ver **Fig. 5**).



Fig. 5. Derrame de sustancias nocivas e incendios.

La caída de componentes arquitectónicos de fachada, puede provocar daños de elementos o personas ubicados en la periferia de la edificación (ver **Fig. 6**).

Elementos divisorios frágiles, como es el caso de divisiones de cristal, ubicados en zonas críticas tales como hospitalización, circulaciones, etc. Pueden causar serios daños a la vida de las personas que se encuentren en la zona e interrumpir la funcionalidad de la instalación (ver **Fig. 7**).



Fig. 6. Caída de componentes arquitectónicos de fachada.



Fig. 7. Divisiones frágiles.

Durante sismos, la vulnerabilidad de tuberías de acueducto, alcantarillado, gas y combustibles depende de su resistencia y flexibilidad. Una alta flexibilidad de las tuberías evita el rompimiento durante un sismo moderado, los asentamientos diferenciales pueden ser compensados y el desplazamiento del suelo no necesariamente conduciría a una rotura. Además los daños en elementos divisorios pueden averiar las instalaciones básicas que las atraviesan (ver Fig. 8 y 9).



Fig. 8. Rotura de tuberías.



Fig. 9. Rotura de instalaciones debido a falla de muros divisorios.

Reducir la vulnerabilidad de los elementos no estructurales descritos anteriormente es imprescindible pues ellos pueden verse afectados por sismos moderados y por tanto más frecuentes durante la vida útil de una edificación. Esto es particularmente importante en el caso de edificaciones esenciales.

Según la propuesta del Comité VISIÓN 2000 (SEAOC, 1995) las edificaciones esenciales son aquellas consideradas críticas para las operaciones de atención de la emergencia sísmica; para FEMA (1999) son aquellas vitales para la respuesta ante la emergencia y posterior recuperación del desastre y para ATC 3-06 (1978) son aquellas donde funcionan instalaciones necesarias en la recuperación posterior al sismo, que deben permanecer en condiciones de funcionamiento durante y después del mismo. En general todas las referencias coinciden en señalar como edificaciones esenciales a los hospitales, estaciones de policías y de bomberos, los centros de control de emergencia, los centros de comunicaciones e inclusive las escuelas pues frecuentemente juegan un papel fundamental como refugio y hospitales de campaña.

Las instalaciones básicas o líneas vitales son el conjunto de sistemas que proporcionan y conducen el suministro de los elementos primordiales para el funcionamiento de las instalaciones esenciales. Entre estas se encuentran las líneas de generación y distribución de energía eléctrica, el suministro de agua potable, la red de comunicaciones, la de evacuación de aguas servidas, entre otras. Además están las redes de suministro de aire medicinal, oxígeno, aire acondicionado, el sistema de generación y distribución de vapor principalmente. Debido a su naturaleza, la falla o rotura de una tubería u otro elemento relacionado puede originar un colapso del sistema, debido a esto, las líneas vitales son un componente no estructural con alta vulnerabilidad.

2.3. Consideraciones sobre como tratan los principales códigos sismorresistentes la protección de los elementos no estructurales

La respuesta dinámica de los componentes no estructurales es un problema complejo que las normas sísmicas han querido resolver con fórmulas sencillas, las cuales dependen de factores que ponderan y conducen a resultados inconsistentes, tales como el peso del elemento, la posición relativa en que se encuentra, la importancia del elemento, la posible amplificación dinámica asociada a la interacción del elemento con la estructura, la exposición a la que se encuentra sometida la estructura y/o la probabilidad de fallo del mismo.

Sin embargo, la mayoría de las normas coinciden en establecer una fuerza de diseño para el componente no estructural, formulada como una fuerza lateral estática equivalente aplicada en el centro de gravedad del elemento analizado.

2.3.1. Código Modelo de Construcción para sismos. Verificaciones de seguridad.

Los elementos no estructurales, así como sus conexiones, accesorios o anclajes, se verifican para la condición de diseño sísmico, determinando los efectos de la acción sísmica aplicando al elemento no estructural una fuerza horizontal definida como sigue:

$$F_a = (S_a W_a \gamma_a) q_a \quad (1)$$

Siendo:

- F_a : Fuerza sísmica horizontal, actuando en el centro de la masa del elemento no estructural en la dirección más desfavorable.
- W_a : peso del elemento.
- S_a : coeficiente sísmico relativo a los elementos no estructurales.
- γ_a : factor de importancia del elemento.
- q_a : factor de comportamiento del elemento.

El coeficiente sísmico S_a puede ser calculado como sigue:

$$S_a = 2aS \frac{\left(1 + \frac{Z}{H}\right)}{\left(1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2\right)} \quad (2)$$

Donde a es la razón de la aceleración del terreno de diseño en un tipo de suelo A, a la aceleración de la gravedad, S el factor de suelo, T_a el período de vibración fundamental del elemento, T_1 : período de vibración fundamental de la edificación principal, Z la altura del elemento no estructural por encima del nivel de aplicación de la acción sísmica y H la altura de la edificación desde el cimiento o desde la parte superior de un sótano rígido.

En este código se describen las características de los muros de mampostería de relleno que no constituyen parte del sistema estructural y pueden verse afectados ante sismos e incluso afectar el comportamiento de la estructura, estableciendo requisitos y criterios para considerar las consecuencias de irregularidad en planta que se pueden producir al ubicar los muros de relleno, así como los efectos de estos sobre columnas incrementando el cortante sobre estas cambiando su modo de fallo de dúctil a frágil. Además se brindan una serie de medidas para garantizar la integridad de los muros.

2.3.2. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR 2010).

Este código establece los elementos no estructurales que deben ser diseñados sísmicamente definiendo tres grados de desempeño para evaluar el comportamiento de estos ante la ocurrencia de un sismo que la afecte, sugiriendo una de dos estrategias de diseño, separar los elementos no estructurales de la estructura o disponer elementos que admitan las deformaciones de esta. Las fuerzas sísmicas de diseño se calculan utilizando la siguiente ecuación:

$$F_p = \frac{a_x a_p}{R_p} g M_p \geq \frac{A_a I}{2} g M_p \quad (3)$$

Siendo:

- M_p : masa del elemento.
- a_x : aceleración en el punto de soporte del elemento.

- a_p : amplificación dinámica del elemento no estructural. Esta amplificación debe obtenerse por medio de análisis dinámicos detallados o ensayos dinámicos experimentales.
- R_p : capacidad de disipación de energía en el rango inelástico del elemento no estructural.

2.3.3. Código Sísmico de Costa Rica 2010.

Para los sistemas y componentes no estructurales, la fuerza sísmica lateral total de diseño, F_p es determinada mediante la siguiente fórmula:

$$F_p = 4.0a_{ef}IW_p \quad (4)$$

Alternativamente, F_p podría ser calculada usando la siguiente fórmula:

$$F_p = \frac{X_p a_{ef} I}{R_p} \left(1 + \frac{3h_x}{h_r} \right) W_p \quad (5)$$

En todo caso F_p debe satisfacer la siguiente condición: $0.7a_{ef}IW_p \leq F_p \leq 4.0a_{ef}IW_p$, siendo:

- a_{ef} : aceleración pico efectiva correspondiente a la edificación.
- I : factor de importancia de la edificación.
- W_p : peso total del sistema o componente en consideración.
- h_x : elevación del centro de masa del componente o elemento con respecto a la base.
- X_p : factor de amplificación del sistema o componente, entre 1.0 y 2.5.
- R_p : factor de modificación de respuesta del componente.

2.3.4. Norma Chilena Oficial Nch433. Diseño Sísmico de Edificios.

Este código plantea tres niveles de desempeño para los elementos secundarios, superior (1.35), bueno (1.0), aceptable (0.75). Las fuerzas de diseño para estos elementos se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$F = Q_p C_p K_d \quad (6)$$

Siendo:

- Q_p : esfuerzo de corte que se presenta en la base del elemento secundario de acuerdo a un análisis del edificio en que el elemento secundario se ha incluido en la modelación.
- El factor de desempeño K_d de este código refleja el nivel de servicio que se exige al elemento secundario durante un evento sísmico, el cual depende del equipo mismo y de la categoría o importancia del edificio.
- El coeficiente C_p representa un factor numérico relacionado con las características dinámicas del elemento y con las consecuencias de su eventual falla, bajo este último concepto está representando un coeficiente de importancia del elemento o equipo, reflejado en los valores de C_p .

En la expresión anterior no se ha considerado el factor de modificación de la respuesta del elemento mismo, en adición a los factores α y R que se utilizan para el análisis sísmico del edificio. Se agrega una alternativa para realizar el diseño y el anclaje de elementos secundarios rígidos y de elementos secundarios flexibles relativamente livianos (peso menor que el 20% del peso sísmico del edificio en que se encuentre ubicado) aplicando la siguiente fuerza sísmica horizontal actuando en cualquier dirección:

$$F = \left(\frac{F_K}{P_K} \right) K_p C_p K_d P_p \quad (7)$$

Los valores de K_p reflejan el fenómeno de resonancia entre la vibración del edificio y la del elemento secundario, obteniéndose del ATC-3 (ATC, 1978) los valores 1 y 2.2 que limitan el rango en que varía el factor de amplificación. El coeficiente K_p puede tomarse alternativamente como uno de los siguientes valores:

a) $K_p = 2.2$	$\beta = 1 \quad 0.8T^* \leq T_p \leq 1.1T^*$
b) $K_p = 0.5 + \frac{0.5}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (0.3\beta)^2}}$	$\beta = 1.25 \left(\frac{T_p}{T^*} \right) \quad T_p < 0.8T^*$
	$\beta = 0.91 \left(\frac{T_p}{T^*} \right) \quad T_p > 1.1T^*$

Donde: T_p es el período propio del modo fundamental de vibración del elemento secundario, incluyendo su sistema de anclaje y T^* es el período del modo con mayor masa traslacional equivalente del edificio en la dirección en que pueda entrar en resonancia el elemento secundario.

Para el caso de los tabiques que se consideren como divisorios se dividen en dos, los que son solidarios con la estructura y los flotantes. Para la protección de estos elementos se regula que la interacción entre la estructura resistente y los tabiques solidarios, los cuales deben seguir la deformación de la estructura, debe estudiarse detalladamente incluyendo estos elementos en el análisis sísmico del conjunto, a menos que el desplazamiento relativo de entrepiso medido en el punto donde se encuentre el tabique sea igual o menor que 0.001 veces la altura de entrepiso. Además para estos tabiques se regula deben aceptar, sin presentar daños significativos la deformación

lateral obtenida luego de amplificar por $\frac{R^* K_d}{3}$ la deformación lateral de entrepiso en el punto donde se encuentre ubicado el tabique. Para los tabiques flotantes se exige que la distancia lateral libre entre estos y la estructura debe ser mayor o igual que la deformación lateral obtenida al amplificar por $\frac{R^* K_d}{3}$ la deformación lateral de entrepiso en el punto donde se encuentre ubicado el tabique. En este caso además se aclara que deben disponerse los anclajes de estos muros de forma tal que cumplan dos funciones: permitir la deformación libre de la estructura resistente y asegurar la estabilidad transversal del tabique.

La estimación de $\frac{R^* K_d}{3}$ veces los desplazamientos horizontales calculados corresponde aproximadamente a lo estipulado en NCh433. Of72 y en el código UBC siendo estos valores validados a partir de las experiencias obtenidas con el tipo de estructuración que se usa en edificios chilenos, aún conociendo que estos valores pueden ser mayores, hasta R^* veces los desplazamientos calculados, si el comportamiento estructural incursiona en el rango inelástico durante eventos sísmicos de intensidad extrema.

La limitación para el desplazamiento de entrepiso fijada en 0.001 veces la altura de entrepiso no considera las características de deformación del tabique y podría no ser válidas en caso de tabiques de gran rigidez. A pesar de ello, se trata de una disposición práctica, fácil de aplicar y válida para la gran mayoría de los tabiques de uso habitual en Chile.

2.3.5. Código Sísmico Norteamericano. Uniform Building Code 1997 (UBC 1997).

Este código exige que todos los elementos de las estructuras, los componentes no estructurales y las conexiones para equipamiento permanente soportado por la estructura deben ser diseñados para resistir la siguiente fuerza sísmica:

$F_p = Z I_p C_p W_p$, siendo:

- Z : factor de zona, el cual esencialmente representa la aceleración pico del suelo en el sitio bajo consideración con un intervalo de recurrencia de 475 años.
- I_p : factor de importancia del equipamiento, igual a 1 para componentes ordinarios y 1,5 para equipamiento crítico.
- W_p : Peso total del elemento.
- C_p : Coeficiente especificado por el código que varía dependiendo del tipo de componente o equipamiento desde 0,75 hasta 2,0.

Los valores de C_p que son dados en el código están concebidos para elementos o componentes rígidos o equipamiento rígidamente soportado y que tengan un período fundamental de vibración menor o igual a 0,6 S. En la ausencia de análisis dinámico o datos empíricos el valor de C_p para componentes flexibles o equipamiento flexiblemente soportados se recomienda tomar como el doble del valor especificado sin exceder el valor de 2,0.

En este código se especifica que para el diseño de todos los elementos componentes de la edificación debe considerarse el movimiento relativo entre ellos, sin embargo no se expone como tener en cuenta este efecto. La alternativa usada por el UBC para el diseño sísmico de estructuras secundarias se basa generalmente en factores empíricos o de juicio ya que los valores de C_p han sido obtenidos básicamente:

- Examinando el comportamiento de componentes no estructurales en sismos pasados.
- Con resultados de algunos análisis realizados a edificaciones de varios niveles con comportamiento lineal.
- Considerando el comportamiento inherente elástico como una capacidad de reserva.

Estas consideraciones sin embargo no incluyen la interacción dinámica entre el componente y la estructura que lo soporta, su localización sobre la estructura, la forma en que está conectado, el movimiento diferenciado de sus componentes ni la capacidad de fluencia de la estructura. Entonces el énfasis está hecho sobre la base de salvar vidas no de prevenir el daño. Funcionalmente está solamente direccionado por el uso de un factor de importancia.

2.3.6. Recomendaciones para el diseño sísmico del Programa para la reducción del riesgo sísmico en Norteamérica (1997 NEHRP Provisions).

Este código establece criterios mínimos para el diseño sísmico de los elementos no estructurales y sus anclajes. Estos criterios de diseño se dan en términos de una fuerza estática equivalente mínima que debe ser resistida por estos elementos así como los desplazamientos relativos mínimos entre los puntos de unión de estos elementos cuando tienen varios puntos de conexión a la estructura.

Para determinar esta fuerza estática mínima se ofrecen dos ecuaciones, la primera bastante conservadora pero bastante simple y fácil de aplicar es la siguiente: $F_p = 4.0 I_p C_a W_p$

La siguiente ecuación resulta algo más compleja al incluir otros factores, ofreciendo generalmente menores valores de fuerza sísmica:

$$F_p = a_p A_p I_p \frac{W_p}{R_p} \geq 0.5 C_a I_p W_p \quad (8)$$

Donde:

- $A_p = C_a + (A_r - C_a) \left(\frac{x}{h} \right)$
- $A_r = 2.0 A_s \leq 4.0 C_a$
- F_p : Fuerza sísmica de diseño aplicada en el centro de gravedad del elemento vertical, lateral o longitudinalmente en combinación con la carga permanente y temporal actuando sobre el elemento.
- a_p : factor de amplificación del componente dado en este código en función del tipo de elemento variando entre 1.0 y 2.5.
- A_p : aceleración expresada como una fracción de la gravedad en el punto de unión con la estructura.
- I_p : factor de importancia del elemento especificado para cada tipo de componente igual a 1 para componentes ordinarios y 1,5 para equipamiento crítico.
- W_p : peso del componente en funcionamiento.
- R_p : factor de modificación de respuesta que varía entre 1.5 y 6.
- C_a : coeficiente sísmico.
- A_r : aceleración, expresada como una fracción de la gravedad en el nivel de piso de la estructura.
- $A_s = \frac{1.2 C_v}{T^3} \leq 2.5 C_a$
- C_v : velocidad efectiva relativa relacionada con la aceleración del terreno especificada como una fracción para el diseño estructural.
- T : período fundamental efectivo de la estructura.

Para determinar el desplazamiento relativo mínimo requerido entre dos puntos de conexión de un componente no estructural con múltiple puntos de anclaje el código recomienda usar el menor de los valores obtenidos al evaluar las siguientes ecuaciones:

$$D_p = \delta_{XA} - \delta_{YA} \quad (9)$$

$$D_p = (X - Y) \frac{\Delta_{aA}}{h_{SX}} \quad (10)$$

Donde: D_p es el desplazamiento sísmico relativo entre anclajes, $\delta_{XA}, \delta_{XB}, \delta_{YA}, \delta_{YB}$ las deflexiones de la edificación bajo fuerzas de diseño multiplicadas por un factor de amplificación que considera las deformaciones inelásticas del nivel X, Y de la edificación A, B, X, Y las alturas sobre el nivel del anclaje al nivel X, Y, Δ_{aA}, Δ_{aB} las deriva de piso admisible para la edificación A, B y h_{SX} la altura del piso.

Las ecuaciones hasta ahora presentadas toman en consideración la amplificación de los movimientos del suelo en los diferentes puntos de la estructura, la localización del componente sobre la estructura, la amplificación del movimiento del piso por las características dinámicas del componente, la ductilidad y la capacidad de absorción de energía del componente y el comportamiento anticipado del componente.

Como tal este código incorpora muchos de los factores que pueden influir sobre el comportamiento sísmico de los elementos no estructurales siendo así más racional que los códigos anteriores. No obstante este código aún presenta algunas limitaciones, por ejemplo las ecuaciones están dadas en términos de dos factores de amplificación

totalmente independientes. Uno es para tener en cuenta la amplificación del movimiento del terreno debido a la estructura en el nivel donde el componente se encuentra anclado a la estructura y otro es para considerar la amplificación debido al componente.

Lo anterior trae como resultado que no se considere del todo la interacción entre el componente y la estructura. De la misma forma este código brinda ecuaciones diferentes, unas para determinar las fuerzas sísmicas máximas de diseño y otras para determinar el desplazamiento relativo máximo permisible entre los elementos de conexión entre el elemento no estructural y la estructura. Entonces los efectos de estas fuerzas y los desplazamientos relativos sobre la estructura se supone son sumados directamente. Esto implica que estos dos efectos máximos ocurren al mismo tiempo, siendo esta una consideración que en el mayor de los casos conlleva a resultados demasiado conservadores.

Otra limitación es el factor de amplificación recomendado, un factor de 2.0 es propuesto para la amplificación estructural y un máximo de 2.5 para la amplificación del componente, estos son factores dados por comisiones de expertos y están justificados sobre la base de resultados experimentales limitados y observaciones de sismos pasados, en ausencia de una base teórica. Además estos valores combinados dan un valor máximo de 5.0, el cual cuando es comparado con los que pueden resultar teóricamente puede no ser suficiente para cubrir todos los casos. Finalmente las ecuaciones recomendadas no tienen en cuenta la fluencia de la estructura siendo este uno de los factores de importancia que deben ser tomados en cuenta a la hora de diseñar los elementos no estructurales.

2.3.7. NC 46:1999 Construcciones Sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción.

En este código la fuerza sísmica total que se usará para diseñar las partes y porciones de la estructura, los componentes permanentes no estructurales así como sus anclajes y los anclajes para el equipamiento permanente soportado por la estructura se calcula por la siguiente fórmula:

$$F_p = A I C_p W_p \quad [\text{KN}] \quad (11)$$

Siendo:

- F_p : fuerza sísmica total.
- W_p : peso del elemento o componente.
- C_p : coeficiente tabulado en la norma en función de cada elemento.
- A : aceleración horizontal máxima del terreno expresada como una fracción de la gravedad correspondiente a una zona sísmica determinada.
- I : coeficiente que tiene en cuenta el riesgo sísmico en función de la importancia de la obra.

En cuanto a la protección de cristales se norma que los cristales deben colocarse en los marcos dejando alrededor de cada panel una holgura mínima calculada por la siguiente fórmula:

$$g = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{a}{b}\right)} \quad (12)$$

Siendo:

- g : holgura en metros.
- Δ : desplazamiento lateral relativo, en metros, producido por la aplicación sobre la estructura del conjunto de fuerzas laterales u obtenido a partir de un análisis modal considerando un comportamiento linealmente elástico de la estructura, entre los extremos del tablero.
- a : altura del tablero en metros.
- b : ancho del tablero en metros.

Se especifica que esta precaución puede omitirse cuando los marcos de las ventanas estén ligados a la estructura de manera tal que las deformaciones de la misma no les afecte.

Este código está basado en el UBC teniendo todas sus limitaciones, teniendo además como agravante que estos criterios no tienen en cuenta las características constructivas y de los materiales de Cuba.

Por la importancia que reviste que las edificaciones esenciales permanezcan funcionando después de un terremoto, es necesario prestar mucha más atención cuando de realizar su diseño se trata. Los elementos no estructurales que puedan desarrollar rigidez y resistencia suficientes para alterar el comportamiento de la estructura, se tendrán en cuenta en la confección del modelo de análisis estructural y se chequearán para las acciones actuantes. Alternativamente, podrán adoptarse soluciones constructivas que aislen estos elementos garantizando la no participación resistente de estos.

En el caso de los elementos no estructurales como equipos y mobiliario debe cuidarse que sean anclados correctamente para evitar que ante el movimiento sísmico se produzca su caída y a la vez su rotura produciendo daños económicos por la pérdida del bien y/o daños a las personas.

Se debe dotar a las líneas vitales de alta flexibilidad seleccionando adecuadamente el material para su construcción evitando así su rotura en caso de un sismo, prestando especial atención en la ubicación de estas.

Conclusiones

La respuesta dinámica de los componentes no estructurales es un problema complejo que las normas sísmicas han querido resolver con fórmulas sencillas, las cuales dependen de factores que ponderan y conducen a resultados inconsistentes, tales como el peso del elemento, la posición relativa en que se encuentra, la importancia del elemento, la posible amplificación dinámica asociada a la interacción del elemento con la estructura, la exposición a la que se encuentra sometida la estructura y/o la probabilidad de fallo del mismo. Por esta razón debe continuarse profundizando en el estudio del comportamiento de estos elementos para así lograr una adecuada coherencia con las ecuaciones que rigen su diseño.

La NC 46:1999, vigente en nuestro país, está basada en el Uniform Building Code (UBC 1997) que no incluye dentro de sus consideraciones la interacción dinámica entre el componente y la estructura que lo soporta, su localización sobre la estructura, la forma en que está conectado, el movimiento diferenciado de sus componentes ni la capacidad de fluencia de la estructura. Además se presenta como agravante que estos criterios no tienen en cuenta las características constructivas y de los materiales de Cuba, lo que puede conllevar al inadecuado comportamiento de los elementos no estructurales.

Por la importancia que reviste la protección de los elementos no estructurales a partir de su adecuado diseño sísmo resistente se hace necesaria la actualización de la norma de diseño sísmo resistente vigente en nuestro país considerando entre otros aspectos los previamente mencionados para el diseño de estos elementos.

Referencias

- Código Modelo de Construcción para sismos. Asociación de Estados del Caribe. 2003
- Código sísmico de Costa Rica. 2010. Colegio federado de ingenieros y arquitectos de Costa Rica
- HAZUS99 technical manual. FEMA-NIBS (Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences), 1999, Washington, D.C.
- NC 46: 1999: *Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción*, La Habana, Comité Estatal de Normalización, 1999.
- NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Developed by the Building Seismic Safety Council for the federal Emergency Management Agency, FEMA, Report 273, Washington D.C, 1997.
- NSR-10. 2010. "Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente", Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá.
- Norma Chilena NCh 433.Of 96. 1996. "Diseño sísmico de edificios", Instituto de Normalización. INN-Chile, 42 p, Santiago.
- SEAO Vision 2000 Committee [1995]; Performance-Based Seismic Engineering, Report prepared by Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
- Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings (ATC 3-06). Applied Technology Council (ATC). 1978.
- UBC.1997. Uniform Building Code, International Council of building officials. Whittier, California.

Acerca de las autoras:

Yelena Berenguer Heredia. Ingeniera Civil. Investigador Agregado. Profesor Instructor Universidad de Oriente. Grupo de Ingeniería Sísmica CENAIIS.

Grisel Morejón Blanco. Ingeniera Civil. Investigador Agregado. Profesor Auxiliar Universidad de Oriente. Vicedirector Científico del CENAIIS. grisel@cenaiss.cu

Kenia Mercedes Leyva Chang. Ingeniera Civil. Especialista para la Ciencia, la Tecnología y el Medio Ambiente. Profesor Auxiliar Universidad de Oriente. Grupo de Ingeniería Sísmica CENAIIS. kenia@cenaiss.cu