



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Morejón-Blanco, Grisel; Llanes-Burón, Carlos; Paulette Frómeta-Salas, Zenaida

**MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE
REDUCCIÓN DE RESPUESTA DE LAS FUERZAS SÍSMICAS**

Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 1, 2018, Enero-Marzo 2019, pp. 24-35

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba

Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358269006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA DE LAS FUERZAS SÍSMICAS

METHODS FOR THE DETERMINATION OF THE RESPONSE REDUCTION FACTOR OF THE SEISMIC FORCES

Autores:

Grisel Morejón-Blanco, grisel@cenais.cu. Teléfono: 642583, 641613, 641607.
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais). Santiago de
Cuba, Cuba.

Carlos Llanes-Burón, llanes@cecat.cujae.edu.cu. Universidad Tecnológica
de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Centro Nacional de
Referencia para la Prevención y Mitigación de Desastres (PREMIDES), Centro
de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Facultad de
Ingeniería Civil. La Habana, Cuba.

Zenaida Paulette Frómeta-Salas, paulette@uo.edu.cu. Universidad de Oriente,
Facultad de Construcciones. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Se presentan los diferentes métodos y procedimientos analíticos para la determinación del factor de reducción de respuesta de las fuerzas sísmicas en edificaciones. Seguidamente, se efectúa un análisis crítico de los códigos de diseño sismorresistentes de diferentes países, con el objetivo de determinar cómo consideran el factor de reducción de respuesta. Se analizaron también sus principales aspectos positivos para su posible utilización en el Código Sismorresistente Cubano.

Palabras clave: factor de reducción de respuesta, ductilidad, sobrerresistencia.

ABSTRACT

Are presented the different methods and analytical procedures for determining the response reduction factor of the seismic forces in buildings. Immediately afterwards, a critical analysis of earthquake resistant design codes in different countries, in order to determine how they consider the response reduction factor, were also analyzed the main positive aspects and its possible use in Cuban Earthquake Resistant Code.

Key words: response reduction factor, ductility, overstrength.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el diseño sismorresistente considera que la resistencia lateral que debe suministrársele a una estructura de ocupación estándar, para que tenga un desempeño estructural adecuado cuando se somete a excitaciones sísmicas, disminuye conforme aumenta su capacidad de deformación plástica. Sobre la base de lo anterior, el diseño sísmico de las estructuras contempla la posibilidad de proporcionarles una capacidad importante de deformación plástica, como una forma de mantener su resistencia lateral de diseño dentro de un intervalo de valores, de modo que su diseño sea asequible desde un punto de vista económico.

Una de las consecuencias de permitir la incursión significativa de las estructuras en su rango de comportamiento poselástico es la aparición de daño estructural significativo, lo cual puede conducir a situaciones indeseables, tales como elevados costos de rehabilitación y un desempeño no estructural deficiente (Arroyo y Terán, 2002).

Los sismos de gran magnitud ponen en evidencia los errores que se cometen en el diseño y la construcción de una edificación. Obviamente, una incorrecta selección de los materiales de construcción es una fuente de error de carácter decisivo. Durante los desastres sísmicos ocurridos en las últimas décadas en el mundo se han producido fallos muy graves en estructuras de hormigón armado; entre estos:

- Falla frágil de cortante en columnas cortas por el efecto restrictivo al desplazamiento causado por elementos no estructurales.
- Fallo frágil en muros de cortante acoplados con o sin aberturas.
- Fallo por variaciones bruscas de la rigidez a lo largo de la altura del edificio.
- Fallo frágil debido al cortante y tensión diagonal en columnas y vigas.
- Fallo de unión viga–columna.

El comportamiento sísmico de las estructuras de hormigón armado ha sido analizado más que cualquier otro. Esto se debe, por una parte, a su uso extendido y, por otra, a la dificultad de dotarle de cierta ductilidad, sobrerresistencia y

redundancia, de manera tal que le permita un comportamiento adecuado durante un movimiento sísmico severo.

Para que las estructuras de hormigón armado presenten un buen desempeño sísmico es necesario que posean al menos un mínimo de ductilidad. Esta característica se refiere a la capacidad que poseen los componentes de un sistema estructural de hacer incursiones alternantes en el dominio inelástico, sin pérdida apreciable de su capacidad resistente (NC 46: 2017). Es una propiedad importante en una estructura sometida a los efectos del sismo, ya que elimina o reduce la posibilidad de un fallo súbito de tipo frágil; además, pone en juego una fuente adicional de amortiguamiento.

El concepto de ductilidad fue incorporado por primera vez en códigos de diseño en la década del 70 (ATC-1974); por lo tanto, es de esperar que las edificaciones diseñadas antes de esta época sean muy vulnerables en caso de que las demandas sísmicas tiendan a alcanzar su capacidad portante cuasi-elástica, lo que se ha podido corroborar en repetidas ocasiones después de la ocurrencia de sismos destructores, tales como Northridge (1994), Kobe (1995), China (1996), Turquía (1999), Taiwán (1999), entre otros.

La sobrerresistencia es consecuencia de la formación secuencial de articulaciones plásticas en una estructura redundante detallada adecuadamente, depende de la incertidumbre de la ejecución y manufactura de la estructura y se adquiere también en el diseño al seleccionar cuantías mayores que las requeridas teóricamente.

La redundancia es la capacidad de una estructura de redistribuir las cargas de los elementos con mayor solicitación a los elementos con menor solicitación.

METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos se realizó una revisión bibliográfica de los diferentes métodos y procedimientos analíticos y experimentales para la determinación del factor de reducción de respuesta; posteriormente, se efectuó un análisis de los códigos sismorresistentes de los países con desarrollo en el campo de la ingeniería sísmica, con el propósito de determinar cómo consideran el factor

de reducción de respuesta; también se analizaron sus principales limitaciones y aspectos positivos para su posible utilización en el Código Sismorresistente Cubano. Se adoptó el siguiente procedimiento.

- Valoración del marco referencial sobre la determinación del factor de reducción de respuesta de las fuerzas sísmicas.
- Revisión crítica de los métodos para la determinación del factor de reducción de respuesta.
- Revisión crítica de los principales códigos de diseño sismorresistente de países con desarrollo de la ingeniería sismorresistente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los procedimientos de análisis y diseño sismorresistente de edificaciones es necesario introducir simplificaciones o aproximaciones que permitan determinar la equivalencia entre el análisis elástico, a partir del cual se realiza el diseño de las estructuras, y el comportamiento elasto-plástico, comportamiento real de las edificaciones cuando son sometidas a la acción de los terremotos.

Una de estas simplificaciones consiste en proyectar las estructuras de manera que estas dispongan de una resistencia lateral inferior a la resistencia elástica, lo cual se logra mediante la aplicación de fuerzas laterales calculadas a partir de espectros de diseño inelásticos, que son espectros de diseño elásticos afectados por factores de reducción de respuesta.

Lo anterior se debe a que los espectros de diseño de los códigos sísmicos tienen un período de retorno de 475 años para una estructura ordinaria, cuya probabilidad de ocurrencia es muy baja durante la vida útil de la estructura; por ello, las estructuras se diseñan para sufrir daños sin llegar al colapso ante el espectro de diseño. Por tanto, ante el sismo prescrito en la normativa, la estructura va a sufrir daño, para lo cual el proyectista estructural debe conferirle suficiente ductilidad, una adecuada sobrerresistencia y redundancia.

Para ilustrar lo anterior, la curva superior que se muestra en la figura 1 corresponde al espectro de diseño elástico del suelo S_2 de la NC 46:2017; si se diseña una estructura con este espectro no va a sufrir daño ante el sismo severo

del código, que tiene un período de retorno de 475 años; pero los elementos estructurales serán de dimensiones considerables y el diseño antieconómico, ya que las fuerzas sísmicas son bastante altas. Si la estructura se diseña para el espectro inelástico, indicado en la curva inferior de la figura 1, que se obtiene dividiendo las ordenadas del espectro elástico por el factor de reducción por ductilidad, las fuerzas sísmicas serán menores.

Del análisis anterior se desprende que si el valor que se le asigna al factor de reducción por ductilidad es alto las fuerzas sísmicas serán bajas; por el contrario, si este factor es bajo las fuerzas sísmicas serán altas. De ahí que fijar valores los más reales posibles constituye la base fundamental para la estimación de las fuerzas sísmicas de diseño.

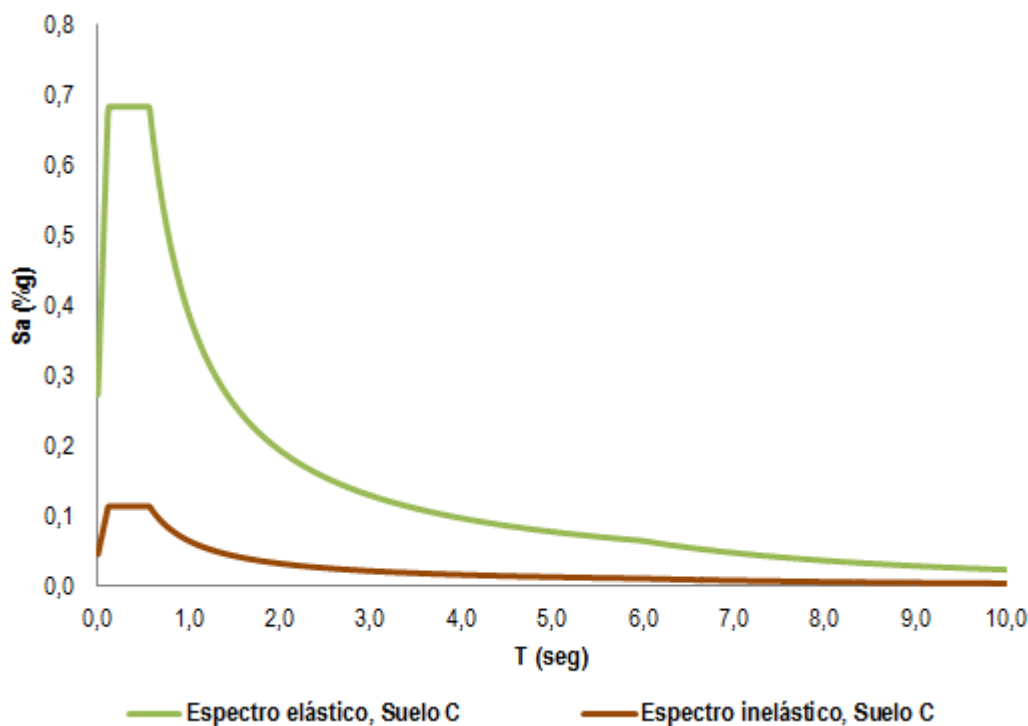


Figura 1. Espectro elástico e inelástico del suelo, Clase C de la NC 46: 2017.

Se han realizado numerosas investigaciones sobre la validez de los factores de reducción de respuesta, gracias a ellos es posible proyectar edificios que tienen una respuesta no lineal, aplicando herramientas de análisis lineal. Inicialmente estos factores fueron formulados solo en función de la ductilidad.

En las últimas décadas se ha realizado un gran trabajo para cuantificar el factor de reducción de las fuerzas sísmicas (R) y se tienen varias formulaciones sustentadas teórica y experimentalmente. La primera de ellas fue enunciada por Bertero, Anderson, Krawinkler & Miranda (1991), Miranda (1997) y Whittaker, Hart & Rojahn (1999), quienes reconocen que el factor R es el producto de cuatro factores (ecuación 1).

$$R = R_{\mu} R_{\Omega} R_{VG} R_R \quad (1)$$

Donde: R_{μ} es el factor de reducción de resistencia por ductilidad, obtenido del sistema de un grado de libertad; R_{Ω} es el factor de sobrerresistencia, definida como la capacidad última de la estructura con respecto a la capacidad de diseño; R_{VG} es un factor de reducción que toma en cuenta que el sistema estructural tiene varios grados de libertad y R_R es el factor de redundancia que indica la eficiencia de los elementos no estructurales para transmitir cargas en el rango no lineal.

Otra formulación muy similar a la anterior se muestra en la ecuación 2, enunciada por Uang (1991), Whittaker *et al.* (1999) y Elnashai y Mwafy (2002) y en la que cambian el factor R_{VG} por el factor de amortiguamiento R_{ξ} . Cuando la estructura ingresa al rango no lineal disipa energía por histéresis, el factor de amortiguamiento R_{ξ} se incrementa conforme más se dañe la estructura, el factor R_{μ} es un factor de reducción debido a la disipación de energía. Riddell y Newmark (1979) consideran el amortiguamiento ξ en el valor de R_{μ} , de forma tal que obtienen un solo factor $R_{\mu\xi}$.

$$R = R_{\mu} R_{\Omega} R_{\xi} R_R \quad (2)$$

Y por último, el ATC-19 (1995) considera que el factor R es igual al producto de tres factores (ecuación 3)

$$R = R_{\mu} R_{\Omega} R_R \quad (3)$$

Asimismo, se estudian los factores que inciden en la determinación del factor de reducción; de lo que se obtiene que los factores R son teóricos y derivan su nombre del hecho de que reducen las fuerzas sísmicas elásticas por su valor para los sistemas estructurales de períodos largos, para los sistemas de períodos cortos la reducción es menor, aunque sigue asociado a este factor.

Del comportamiento de diferentes tipos de estructuras ante solicitaciones cíclicas producidas por las acciones sísmicas resulta inevitable una determinada reducción de rigidez y resistencia y con esto una reducción de la capacidad de disipación de energía del sistema, por lo que resulta imprescindible estimar o fijar reducciones admisibles bajo determinados registros de sismos reales o sintéticos. Se ha comprobado que resulta muy difícil o casi imposible establecer criterios precisos que consideren el período propio de la estructura y la duración probable de un sismo y con esto de un número posible de ciclos de solicitaciones.

Los códigos aceptan, implícita o explícitamente, que bajo acciones sísmicas severas las edificaciones comunes hagan incursiones importantes en el rango inelástico; por esta razón y como se ha dicho anteriormente, la mayoría de ellos utilizan en el diseño espectros de respuesta elástica a partir de un factor de reducción de respuesta, garantizado por el sistema resistente a sismos. Por tanto, se puede considerar que estos son los estados previos a la condición límite de colapso; de hecho, parte importante de las pérdidas materiales están representadas por el riesgo de colapso de la edificación. De lo anterior es evidente que la capacidad de predecir dicho estado límite está asociada a una incertidumbre mayor y requiere consideraciones especiales.

Con este fin los códigos utilizan diversos criterios de diseño en dependencia de las características de cada país y la información y medios con que cuentan, por lo que existe una gran variedad de métodos y metodologías para la determinación de

cada uno de los parámetros que inciden en la seguridad sísmica de las estructuras. A continuación, se presenta un análisis crítico de la forma en que se trata el factor R en los códigos sismorresistentes de diferentes países.

En el Código Sismorresistente Cubano (NC 46:2017) la reducción de las fuerzas se cuantifica con el Coeficiente de Reducción por Ductilidad (R_d), que describe la ductilidad global esperada del sistema resistente a sismos y no es más que la relación entre los desplazamientos máximos reales y los desplazamientos calculados, suponiendo un comportamiento linealmente elástico de la estructura. Estos valores fueron extrapolados de otras normativas, sin tener en cuenta que dependen de la ductilidad, la sobrerresistencia y la redundancia estructural de los materiales y sistemas constructivos; lo que trae como consecuencia que las fuerzas sísmicas que se utilizan en el diseño no corresponden a las necesarias para garantizar el desempeño adecuado de las estructuras ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud. Lo anterior puede provocar el fallo de las estructuras y las consecuentes pérdidas de vidas humanas y materiales.

Los valores tabulados en el código dependen del tipo de estructura y del nivel de diseño sísmico. Es necesario destacar que este código no considera la sobrerresistencia de los materiales de forma explícita, pero sí implícitamente, debido a que clasifica los sistemas estructurales según el material estructural.

Se revisaron los códigos sismorresistentes de los países con desarrollo en la ingeniería sísmica, tomando sus principales limitaciones y aspectos positivos para su utilización en futuras actualizaciones del Código Sismorresistente Cubano. De este análisis se obtuvieron los siguientes resultados.

- El primer aspecto importante es que en todos los códigos revisados los factores de reducción de respuesta para estructuras de acero son mayores que los correspondientes a estructuras de hormigón; asimismo, algunos códigos consideran valores para sistemas estructurales usualmente usados en el diseño de edificaciones.
- En la mayoría de los códigos, como por ejemplo los latinoamericanos, los factores de reducción dependen solamente de la ductilidad, para lo cual se fijan niveles de diseño en la etapa de proyecto. Solo en el Eurocódigo EC-8

(Comité Européen de Normalisation [CEN], 2012) los factores de reducción dependen de la sobrerresistencia y el amortiguamiento, al considerar coeficientes multiplicadores que varían de acuerdo con la redundancia estructural y los materiales estructurales; aunque hay que destacar que no se realiza una referencia directa a este factor en el código.

- El Código español NCSE (España. Ministerio de Fomento, 2002) es el único que sí presenta una referencia directa de la influencia del amortiguamiento en el cálculo de los factores de reducción. Sin embargo, recomienda el valor promedio clasificado de acuerdo con el material estructural, sin hacer referencia a las consideraciones de valores que dependen de la influencia de los elementos no estructurales, tales como la densidad y distribución de los muros de mampostería, que se ha demostrado alteran los valores esperados del amortiguamiento de las estructuras.
- La amplificación del movimiento sísmico para distintos tipos de suelo se considera de forma explícita en el Eurocódigo EC-8 (CEN, 2012) y en el venezolano COVENIN 1756 (Caracas, Venezuela. Ministerio de Desarrollo Urbano, 2001), al adoptar valores de factores de amplificación dinámica que dependen de las características geotécnicas, representadas por la velocidad de las ondas de cizallamiento y por los espesores de los estratos. El código español NCSE (España. Ministerio de Fomento, 2002) presenta valores máximos como consecuencia de la amplificación, similares para los suelos contemplados en el código.
- En los códigos sismorresistentes se encuentran pocas referencias explícitas de la influencia de la redundancia estructural sobre los factores de reducción de respuesta. La redundancia no se encuentra bien definida en las normas de proyecto sismorresistente y su efecto se asocia generalmente con los factores de reducción por reserva de resistencia; si bien existe una creencia generalizada sobre los beneficios que aporta la reserva de resistencia a la respuesta dúctil de las estructuras, en pocos casos se encuentran referencias claras de cómo debe ser calculada e incorporada en el proyecto de manera explícita.

- En los códigos más recientes se comienzan a incorporar aspectos sugeridos en estudios recientes, tales como la redundancia estructural, ejemplo de esto son los factores que incrementan los factores de reducción del Eurocódigo EC-8 (CEN, 2012) y el colombiano NSR-10 cuando las estructuras cumplen ciertas características de redundancia de elementos resistentes verticales. Igualmente estos factores, aunque de carácter aproximado, se observan en el International Building Code (IBC) (2003) y en la NC 46: 2017. A pesar de esto, los criterios empleados, que consisten esencialmente en la reducción del factor de reducción de respuesta R , son empíricos y no tienen la posibilidad de que el proyectista pueda modificar o seleccionar adecuadamente el factor de redundancia sobre la base de las características del edificio que se encuentra analizando.
- La regularidad estructural es considerada directamente en el Eurocódigo EC-8 (CEN, 2012), el código colombiano, el dominicano, el nuevo código cubano y el código japonés; en el resto de los códigos analizados solo se considera de forma indirecta.

CONCLUSIONES

1. En los factores de reducción de respuesta teóricos, utilizados en los códigos para la reducción de las fuerzas sísmicas elásticas, se utilizan valores constantes, tanto para sistemas estructurales de períodos largos como para los de períodos cortos.
2. Del análisis del comportamiento de diferentes tipos de estructuras ante sollicitaciones cíclicas producidas por las acciones sísmicas resulta inevitable la necesidad de reducir la rigidez y la resistencia y con esto una reducción de la capacidad de disipación de energía del sistema, por lo que es imprescindible fijar reducciones admisibles.
3. Muchos códigos tienen el defecto de considerar una reducción de fuerzas debido al comportamiento inelástico, solamente en relación con valores máximos de deformación o energía disipada.

4. En la mayoría de los códigos sísmicos vigentes el período, el amortiguamiento y el tipo de suelo en el sitio no están considerados explícitamente en el factor de reducción de respuesta, lo cual propicia diseños inadecuados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Applied Technology Council [ATC]–19. (1995). *Structural response modification factors*. California, USA: autor.

Applied Technology Council [ATC]–74. (1974). *An evaluation of a response spectrum approach to the seismic design of buildings. Report ATC-2*. California, USA: autor.

Arroyo, D. y Terán, A. (2002). Factores de reducción de fuerzas sísmicas para el diseño de estructuras con sistemas pasivos de disipación de energía. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 66, 73-93.

Bertero, V., Anderson, J., Krawinkler, H., & Miranda, E., (1991) *Design guidelines for ductility and drift limits: Review of state-of-the-practice and of the art on ductility and drift-based earthquake-resistant design of buildings*, Report on Task1, A CUREe-Kajima Research Report.

Caracas, Venezuela. Ministerio de Desarrollo Urbano (2001). *Norma COVENIN 1756. Edificaciones Sismorresistentes, FUNVISIS*. Caracas, Venezuela: autor.

Comité Européen de Normalisation [CEN]. (2012). *Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance*. Bruselas, Bélgica: autor.

Elnashai, A., & Mwafy, A. (2002), Overstrength and force reduction factors of multistory reinforced-concrete buildings, *Struct. Design Tall Building*, 11, 329-351.

Cuba. Oficina Nacional de Normalización NC. (2017). *NC 46:2017: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción*. La Habana, Cuba: autor.

España. Ministerio de Fomento. (2002). *Norma de construcción sismorresistente: parte general y edificación. [NCSE-02]*. España: autor.

International Building Code (IBC). (2003). *International Building Conference of Building Officials*. Whittier, California.

Miranda E., (1997), *Strength reduction factors in performance-base design*, UCB/EERC-97/05. University of California, Berkeley.

NSR-98 (1998). *Normas colombianas de diseño y construcciones sismorresistente*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Recuperado de http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/docentes/oscar_gutierrez/descargas/TxtuloF.pdf

Riddell, R., & Newmark, N., (1979), *Statistical Analysis of the response of nonlinear systems subjected to earthquakes*, *Civil Engineering Studies, Structural Research Series*. Department of Civil Engineering. University of Illinois. Illinois, USA.

Uang, C. (1991) Establishing R (or R_w) and C_D factor for building seismic provisions. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 117(1), 9-28.

Whittaker, A., Hart, G. & Rojahn C. (1999). Seismic response modification factors. *Journal of structural engineering*, 125(4), 438-444.

Recibido: junio de 2017

Aprobado: diciembre de 2017