

Comparación de los factores de reducción de respuesta de la norma NCSE-02 y del Eurocódigo 8

A comparative study of the response reduction factors of the NCSE-02 code and the Eurocode-8



Alex H. Barbat

E.T.S. Ingenieros de Caminos, C. y P.
Universidad Politécnica de Cataluña



Juan Carlos Vielma

Decanato de Ingeniería Civil, Barquisimeto, Venezuela
Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado



Sergio Oller

E.T.S. Ingenieros de Caminos, C. y P.
Universidad Politécnica de Cataluña

RESUMEN

En los procedimientos de análisis y diseño sismorresistentes de estructuras se hace necesario introducir simplificaciones o aproximaciones que permitan estudiar la equivalencia entre el análisis elástico a partir del cual se efectúan los cálculos y el comportamiento elásto-plástico, que es el comportamiento real de las estructuras cuando son sometidas a las acciones de terremotos fuertes. Una de estas simplificaciones, consiste en proyectar las estructuras de manera que dispongan de una resistencia lateral inferior a la que resulta de un dimensionado al límite elástico, lo que se consigue aplicando cargas laterales calculadas a partir de los espectros de diseño, que son espectros elásticos, afectados por factores de reducción de respuesta, conocidos como factores R. En este artículo se realiza una revisión exhaustiva del estado del arte de los factores de reducción de respuesta, partiendo de su definición, pasando por su implementación en las normas de diseño sismorresistente, hasta llegar a las nuevas propuestas de racionalización de su aplicación. Para poder alcanzar una mejor comprensión del tema, se realiza una comparación entre la aplicación de los factores de reducción de respuesta propuestos en la norma sismorresistente española NCSE-02 y en el Eurocódigo 8.

ABSTRACT

In the procedures of seismic analysis and design of structures, it is necessary to introduce simplifications or approxima-

tions which allow achieving the equivalence between results of elastic analysis, on which are based the seismic codes, with results obtained considering the nonlinear, plastic, behavior of structures, which correspond to their real behavior when subjected to strong earthquake actions. One of these simplifications consists of designing the structures in such a way to assure a lateral strength lower than the elastic one. This lateral strength is obtained by applying calculated lateral loads using inelastic design spectra, obtained by dividing the elastic ones by response reduction factors, also known as R factors. In this study an exhaustive revision of the state-of-the-art of these response reduction factors is made, which starts from its original proposal, goes through its implementation into seismic design codes, until arriving to new proposals of application. Finally, in order to be able to reach a better understanding of the topic, a comparative study between the response reduction corresponding to the Spanish code NCSE-02 and to the Eurocode-8 is made.

1. ANTECEDENTES

El concepto de factor de reducción de respuesta parte de la premisa de que un sistema estructural adecuadamente armado es capaz de soportar grandes deformaciones sin llegar a colapsar. Al aplicar en el proyecto de estructuras sismorresistentes factores de reducción mayores que la unidad, el proyectista acepta una simplificación importante, basado en la premisa que con herramientas de cálculo lineal se pueden obtener una cuantificación razonable de la respuesta real de una estructu-

ra. Un segundo aspecto es que, si se acepta un comportamiento significativamente no lineal, es lógico esperar que ocurra un daño global importante en la estructura.

La adopción de los factores de reducción para determinar fuerzas sísmicas de diseño a partir de un cálculo elástico se ha realizado partiendo de los valores sugeridos inicialmente por Veletsos y Newmark [1], que vincularon los factores de reducción de respuesta con los valores esperados de ductilidad estructural, de acuerdo con los rangos de períodos correspondientes al espectro de aceleraciones. Los valores adoptados obedecen a los criterios derivados de la comparación de los espectros elásticos e inelástico de respuesta, los cuales mostraban iguales fuerzas para el rango de frecuencias altas, igual energía absorbida para el rango de frecuencias intermedias e iguales desplazamientos para las frecuencias bajas. Esto permitió plantear los valores para los factores de reducción de la Tabla 1.

Tabla 1. Valores del factor de reducción de respuesta propuestos por Newmark y Veletsos (1960).

$R = 1$	Para $T=0$
$R = \sqrt{2 \cdot \mu - 1}$	Para el rango de períodos bajos
$R = \mu$	Para el rango de períodos intermedios y largos

En esta tabla, R es el factor de reducción, μ es la ductilidad estructural y T su período. La ductilidad estructural se determina como la relación entre el desplome último, Δ_U , de un punto predeterminado, usualmente el nivel más elevado del edificio, y el desplome de plastificación idealizado de la estructura, Δ_Y , de un punto predeterminado, usualmente el nivel más elev, que se define como el desplome para el que aparece la primera rótula plástica

$$\mu = \frac{\Delta_U}{\Delta_Y} \quad (1)$$

El procedimiento se ha mantenido a lo largo de los años en las normas de diseño sismorresistente debido al buen comportamiento exhibido por las estructuras proyectadas con este método, que ha permitido mantener su integridad y preservado vidas al haber sido sometidas a sismos fuertes. La dependencia del factor de reducción respecto a la ductilidad global y del período estructural ha prevalecido en las normas de diseño, a pesar de que recientes investigaciones han demostrado que aplicar dichos factores conduce a un proyecto poco seguro para el rango de los períodos bajos y excesivamente conservador para los períodos intermedios y largos, Ordaz y Pérez-Rocha [2].

Al nivel normativo, los factores de reducción son considerados por primera vez de forma explícita en el articulado del Blue Book [3] en el cálculo del esfuerzo cortante mínimo considerado en el análisis de edificios, mediante la expresión:

$$V_b = C \cdot k \cdot W \quad (2)$$

En esta expresión, V_b es el cortante en la base mínimo, C es un factor a determinar que depende del período fundamental de la estructura, K es un factor de reducción que depende del tipo estructural considerado y cuyo valor es el inverso del factor de reducción de respuesta propiamente dicho y W es el peso sísmico total del edificio. Desde esta primera aproximación se realiza la recomendación de que los factores de reducción deberían ser aplicados de acuerdo con el juicio del proyectista, pero requiriendo profundizar en la determinación más precisa de los valores de éstos.

Posteriormente, el UBC [4] incluye el factor de zonificación Z en la expresión de cálculo del cortante mínimo de diseño, manteniendo el factor de reducción en el formato de K de la expresión anterior.

$$V_b = Z \cdot C \cdot K \cdot W \quad (3)$$

Los factores de reducción R , tal como se les conocen actualmente, son desarrollados en la publicación del ATC-3-06 [5] que modernizó todo el procedimiento general aplicado en la ingeniería sísmica. El procedimiento propuesto permite la aplicación del método de las fuerzas sísmicas equivalentes reduciendo el cortante en la base V_e calculado a partir del espectro de diseño elástico con un amortiguamiento igual al 5% del amortiguamiento crítico $S_{a,5}$ y del correspondiente peso sísmico del edificio W

$$V_b = \frac{V_e}{R} = \frac{S_{a,5} \times W}{R} \quad (4)$$

Tal como puede verse, el cortante de diseño en la base, V_b , se calcula dividiendo el cortante en la base elástico, V_e , por el factor de reducción R ; generalmente el peso sísmico W corresponde al 100% de las cargas permanentes más un porcentaje de las sobrecargas de uso.

Posteriormente, la adecuación de las normas de diseño sismorresistente al cálculo de secciones basado en resistencia, que sustituía al análisis por tensiones admisibles, propició la aparición del factor de reducción R_w que, en términos generales, tenía valores mayores que su predecesor. Este nuevo factor de reducción se encuentra en el articulado del UBC-97 [4] y del IBC-2003[6]; sin embargo en las últimas revisiones de dichos códigos ha sufrido importantes reducciones respecto a las versiones anteriores.

2. COMPONENTES DEL FACTOR DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA

2.1. Propuesta de Bertero [7]

Esta propuesta ha sido posteriormente apoyada por Witthaker *et al.* [8] e incluye la redundancia estructural como un factor independiente en la determinación de los factores de reducción de respuesta. Sin embargo, es necesario señalar que hasta la fecha no existen investigaciones que confirmen su grado de participación o rango de valores aplicables a las distintas tipologías estructurales. La propuesta se muestra en la expresión siguiente:

$$R = R_S \cdot R_\mu \cdot R_{VG} \cdot R_{SR} \quad (5)$$

donde, el factor de reducción R queda definido como el producto de cuatro factores: el factor de reducción por resistencia, R_S , el factor de reducción por ductilidad, R_μ , el factor de reducción por múltiples grados de libertad, γ , y el factor de reducción por redundancia, R_{SR} .

2.2. Propuesta de Witthaker et al. [9]

En esta propuesta se estima que el factor de reducción de respuesta es el producto de tres factores interrelacionados entre sí

$$R = R_S \cdot R_\mu \cdot R_\xi \quad (6)$$

Los factores son: el factor de reducción por resistencia, R_S , que contiene la reducción debida a las consideraciones conservadoras supuestas en el diseño en general, el factor de reducción por ductilidad R_μ que considera la influencia de la ductilidad y el factor de reducción por amortiguamiento R_ξ , que incluye el efecto del amortiguamiento propio de los materiales de la estructura. De estos tres factores, el primero puede determinarse directamente de la curva de capacidad, como la relación entre los cortantes en la base

$$R_S = \frac{V_u}{V_b} \quad (7)$$

siendo V_u el cortante en la base último y V_b el cortante en la base de diseño. El factor de reducción por ductilidad, R_μ , viene dado por la relación entre el cortante en la base elástico, V_e , y último, V_u , obtenidos a partir de la curva de capacidad de la estructura

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_u} \quad (8)$$

Witthaker *et al.* [9] proponen el cálculo de los factores de reducción por amortiguamiento R_ξ a partir de las características dinámicas de la estructura representadas por el período fundamental y de acuerdo con el amortiguamiento de los materiales de la estructura.

2.3. Propuesta ATC-19 [10]

En la propuesta del ATC-19 [10], el factor de amortiguamiento ha sido excluido. Se considera que el factor de reducción de respuesta, R , es el producto de tres factores: el de reducción por resistencia, R_S , el de reducción por ductilidad, R_μ , y otro factor, denominado factor de redundancia, R_R .

$$R = (R_S \cdot R_\mu) \cdot R_R \quad (9)$$

De estos tres factores, los dos primeros son dependientes del período y se definen de forma similar a la expuesta en el apartado anterior, mientras que los valores del factor de redundancia suelen ser valores fijos sugeridos para distintos tipos estructurales, sin que exista claridad en cuanto a su determinación ya que suelen incluirse dentro del factor de reserva de resistencia.

3. RECIENTES INVESTIGACIONES SOBRE LOS COMPONENTES DE R

3.1. Factores de reducción con base en la ductilidad

Dada la evidente importancia de los factores de reducción basados en ductilidad R_μ en el cálculo de factores de reducción de respuesta, se incluye en este apartado una revisión del estado del arte que contempla trabajos realizados aplicando diferentes enfoques, así como modelos estructurales.

Nassar y Krawinkler [11]

Utilizaron el modelo elasto plástico bilineal en el cálculo de la respuesta inelástica de sistemas de un grado de libertad para diferentes niveles de ductilidad global. Los espectros de R_μ se expresan en función del período estructural, T , de la ductilidad global μ y del endurecimiento post-plastificación α

$$R_\mu = [c \cdot (\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (10)$$

$$c(T, \alpha) = \frac{T^\alpha}{1 + T^\alpha} + \frac{b}{T}$$

donde el parámetro de ajuste b depende de la rigidez post-plastificación α .

Vidic et al. [12]

Plantearon espectros de R_μ obtenidos como la idealización de espectros obtenidos mediante un modelo histerético poligonal, cuyos parámetros de ajuste se calculan a partir de las características del material de la estructura. El espectro tiene dos ramas lineales dependientes del período

$$T < T_0$$

$$R_\mu = C_1 (\mu - 1)^{C_R} \frac{T}{T_0} + 1 \quad (11)$$

$$T \geq T_0$$

$$R_\mu = C_1 (\mu - 1)^{C_R} + 1$$

donde el período característico de la estructura, T_0 , depende de la ductilidad global, de la relación entre la demanda-capacidad de la estructura y del tipo de material. Los parámetros C_1 y C_R dependen del comportamiento histerético y del amortiguamiento, respectivamente.

Miranda y Bertero [13]

Esta investigación introdujo la influencia del terreno en el cálculo de factores de reducción por ductilidad, para lo que utilizó el análisis de la respuesta no lineal de los suelos para determinar la respuesta en superficie y el modelo elasto plástico perfecto para determinar la respuesta inelástica de las estructuras modelizadas como sistemas de un grado de libertad. La expresión utilizada es:

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1 \quad (12)$$

El factor ϕ contiene la dependencia del período y la información relativa a la influencia del tipo de suelo

$$\begin{aligned}\phi &= 1 + \frac{1}{12 \cdot T - \mu \cdot T} - \frac{2}{5T} \cdot e^{-1.5(T-0.2)^2} && \text{Roca (suelo tipo S1)} \\ \phi &= 1 + \frac{T_g}{3 \cdot T} - \frac{3T_g}{4T} \cdot e^{-3\left(\frac{T}{T_g} - 0.25\right)^2} && \text{Depósitos aluvionales (suelo tipo S2)} \\ \phi &= 1 + \frac{T_g}{3 \cdot T} - \frac{3T_g}{4T} \cdot e^{-3\left(\frac{T}{T_g} - 0.25\right)^2} && \text{Suelos blandos (suelo tipo S3)}\end{aligned} \quad (13)$$

Siendo T_g el período característico del suelo, S1 corresponde a suelos rocosos, S2 a depósitos aluvionales y S3 a suelos blandos.

Ordaz y Pérez Rocha [2]

Proponen espectros de R_μ calculados a partir de espectros elásticos de desplazamiento y de velocidades divididas por el desplazamiento y velocidad máxima del terreno. La novedad de este enfoque es que permite incorporar directamente el efecto de sitio sin tener expresiones que dependan explícitamente del período estructural. La expresión propuesta es la siguiente:

$$R_\mu = 1 + \left(\frac{V(T)}{V_{\max}} \right)^\alpha \left(\frac{D(T)}{D_{\max}} \right)^\beta (\mu - 1) \quad (14)$$

Es de hacer notar, sin embargo, que el período queda incluido de forma implícita en los espectros de velocidad $V(T)$ y de desplazamiento $D(T)$.

Lee, Han y Oh [14]

Utilizaron diferentes modelos histeréticos poligonales que les permitieron establecer el grado de influencia del tipo de degradación en los valores de R_μ de sistemas de un grado de libertad. La expresión depende del período de la estructura y de la ductilidad global esperada

$$\begin{aligned}R_\mu &= A_0 \left[1 - e^{-B_0 T} \right] \\ A_0 &= 0.99 \cdot \mu + 0.15 \\ B_0 &= 23.69 \cdot \mu^{-0.83}\end{aligned} \quad (15)$$

Chakraborti y Gupta [15]

Este trabajo presenta un enfoque similar al trabajo de Ordaz y Pérez Rocha pero, además de aplicar modelos que incorporan degradación de la estructura, incorporan las características de sitio al escalar los espectros de diseño (aceleraciones) previamente normalizados respecto a la aceleración pico del terreno. En este caso, los espectros de R_μ sí poseen una dependencia explícita del período estructural:

$$R_\mu = \beta(T) \left(\frac{\text{PSA}(T)}{\text{PGA}} \right)^{\alpha(T)} + \mu \left(\frac{T}{10} \right)^\beta \quad (16)$$

Vielma et al. [16]

Consideran los comportamientos histeréticos del suelo y de la estructura, utilizando modelos no lineales con degradación de rigidez, deterioro de resistencia y estrangulamiento propios de los tipos estructurales incluidos en las normas sismorresistentes. Los factores R_μ propuestos se calculan a partir de espectros medios para cada combinación de casos específicos, obteniendo espectros idealizados bilineales dependientes de la ductilidad global, del período estructural y de los parámetros de ajuste que incluyen la respuesta degradada y la influencia del terreno, que van desde los más rígidos hasta los más blandos

$$\begin{aligned}T &< T_g \\ R_\mu &= 1 + \mu \cdot T / (a \cdot T_g) \\ T &\geq T_g \\ R_\mu &= 1 + \frac{\mu}{a} + bT\end{aligned} \quad (17)$$

Dolšek y Fajfar [17]

Investigan la influencia de la degradación de estructuras de hormigón armado y mampostería, realizando un estudio paramétrico mediante un modelo poligonal representativo de la degradación combinada de ambos materiales. Obtienen expresiones para los factores de reducción haciendo énfasis en dos aspectos: el primero considera que la influencia de la degradación es importante en la determinación de factores de reducción; segundo, que los espectros inelásticos de diseño adquieren una forma diferente a la clásica en las normas de diseño, consistente de tres ramas donde la rama de aceleraciones, al tener valores de los factores de reducción variables, esta rama ya no es horizontal, sino que presenta pendiente negativa. Tercero, resaltan la importancia de compatibilizar los espectros de diseño con los espectros de reducción para obtener rangos de períodos para el cambio de las expresiones de reducción. La expresión básica propuesta por Dolšek y Fajfar es

$$R_\mu = c(\mu - \mu_0) + R_0 \quad (18)$$

donde R_0 es la reducción que depende del período y de la ductilidad reducida aportada por la mampostería, c es un coeficiente que se obtiene mediante el período de esquina, el grado de deterioro de resistencia esperado y el período fundamental de la estructura, μ es la ductilidad global y μ_0 es la ductilidad complementaria que es también función de la ductilidad de la mampostería.

3.2. Factores de reducción por reserva de resistencia

La gran cantidad de factores que intervienen en la reserva de resistencia hacen que ésta sea difícil de cuantificar a nivel de cada elemento estructural evitando que pueda ser incorporada de forma racional en las normas de diseño sismorresistentes a pesar de que se la considera muy importante en la mejora de la respuesta de los edificios; por esto es más conveniente considerar el efecto de la reserva de resistencia sobre la respuesta global de la estructura mediante la utilización de las relaciones de fuerza-deformación obtenidas del análisis estático inelástico ("pushover analysis").

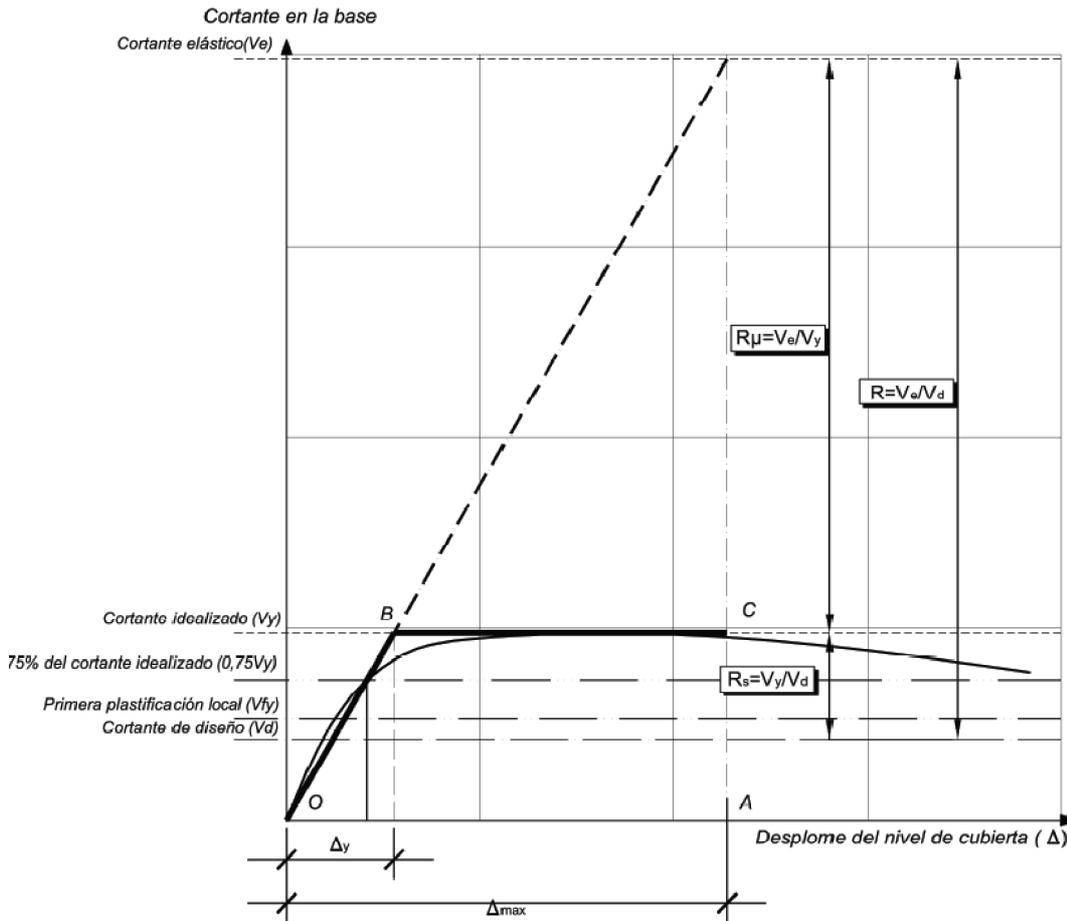


Figura 1. Resistencias y desplomes característicos para el cálculo de la reserva de resistencia y de la ductilidad estructural.

La incorporación del factor de reserva de resistencia no se realiza de forma explícita en las normas de diseño debido a esta gran cantidad de factores; sin embargo un mejor conocimiento del fenómeno permitiría su aplicación desacoplada del factor de reducción de respuesta R.

El factor de reserva de resistencia R_s se define como la relación entre el cortante en la base idealizado, V_y y el cortante en la base de diseño, V_d . Esta diferencia de ordenadas resulta del hecho de proyectar para grupos de fuerzas incrementadas de forma estadística con base en la dispersión que estas presentan (mayores que las resistidas por la estructura durante su vida útil) conjuntamente con propiedades minoradas de los materiales reducidas por ciertos factores, que intervienen en la determinación de V_d . Además, el diseño de los elementos sismorresistentes requiere satisfacer condiciones de desplomes máximos (desplomes relativos de piso) y de detalles de armado para mejorar su capacidad de disipación dúctil de la estructura.

En la Figura 1 se puede observar cómo se establecen las relaciones de resistencia. Primero, la curva de capacidad permite definir un comportamiento elasto plástico idealizado, considerando el punto para el que se alcanza el máximo cortante en la base. Dicho cortante máximo se produce en un punto en el que la estructura ha alcanzado el comportamiento plástico, permitiendo ubicar el segmento horizontal B-C. Seguidamente se define la recta de comportamiento elástico O-B uniendo el origen con el punto sobre la curva de capaci-

dad que corresponde al 75% del valor del cortante máximo idealizado. Puede observarse que este punto presenta un cortante en la base superior que se alcanza al ocurrir la primera plastificación o formación de la primera rótula plástica en algún punto de la estructura. Además este punto permite definir un desplazamiento “elástico”.

Tabla 2. Factores de reducción por reserva de resistencia

Investigación	Casos estudiados	R_s
Osteraas y Krawinkler [18]	Pórticos resistentes a momentos	2,1-6,5
	Pórticos permimetrales	1,8-3,5
	Pórticos con diagonales concéntricas	2,2-2,8
Uang y Maarouf [19]	Edificio de acero de 13 niveles	4,0
	Edificio de hormigón armado de 6 niveles	1,9
Hwang y Shinozuka [20]	Edificio de hormigón armado de 4 niveles	2,2

Los aspectos anteriores conducen finalmente a secciones con resistencia superior a la calculada por simple resistencia. En la Tabla 2 puede verse que existe una clara dispersión de los factores de reserva de resistencia R_s para edificios porticados de hormigón armado, por lo que es necesario profundizar en este campo (Tabla 2). Los valores de reserva de resistencia más altos corresponden a los pórticos en los que las cargas gravedad tienen una mayor influencia sobre el diseño de las

secciones. Por esta razón, la reserva de resistencia de los pórticos resistentes a momento alcanza valores más altos que en los pórticos perimetrales, para los que las cargas de gravedad son menores, pero mantienen las mismas fuerzas sísmicas de diseño que los pórticos resistentes a momento. Al establecer la relación entre el diseño actual de edificios de hormigón armado y el diseño elástico, se llega a alcanzar valores de los factores de resistencia R_s que en todo caso presentan la misma dispersión de valores (véase la Tabla 3).

Tabla 3. Factores de sobre resistencia, de acuerdo con diferentes autores

Casos de estudio	R_s
Edificios de hormigón armado de media y baja altura	1,6-4,6
Edificios de hormigón armado con irregularidades en elevación	2,0-3,0

La estimación de los factores de reducción por resistencia R_s se complica por efectos como la resistencia actualizada de los materiales (una vez que el material ha tenido un comportamiento plástico o ha ocurrido daño), los efectos del confinamiento, presencia de elementos estructurales tales como losas de hormigón y elementos no estructurales no considerados de forma explícita en el análisis, siendo necesario reconocer que no todos estos efectos contribuyen favorablemente, al incremento del factor de reserva de resistencia. Entre los efectos que pueden tener contribución desfavorable se incluyen el incremento de la reserva de resistencia en vigas que puede dar origen al fallo frágil por cizallamiento debido a elementos de cerramiento que pueden causar efectos de columna corta y debido a las irregulares distribuciones de las alturas de los pilares y la discontinuidad en las líneas resistentes verticales pueden producir el efecto de piso blando. En la Tabla 4 se presenta una lista que contiene los factores anteriormente citados y la etapa del proyecto de la edificación en la cual son incorporados.

Jain y Navin [21] estudiaron los valores de reserva de resistencia en edificios de hormigón armado considerando la

influencia de la intensidad sísmica representada por la aceleración de diseño correspondiente a diferentes zonas sísmicas de la India y del número de niveles del edificio. Los resultados de la Figura 2, en la que las zonas sísmicas van desde la de menor amenaza (I) a la de mayor amenaza (V) de dicha norma muestran que la reserva de resistencia es mayor para edificios ubicados en zonas de baja sismicidad en los que predomina el diseño por cargas gravitacionales. Igualmente, debe resaltarse el hecho que, para edificios de baja altura en los que las fuerzas sísmicas de piso no adquieren valores tan altos como en los edificios de mayores alturas, los factores de reserva de resistencia presentan valores más grandes.

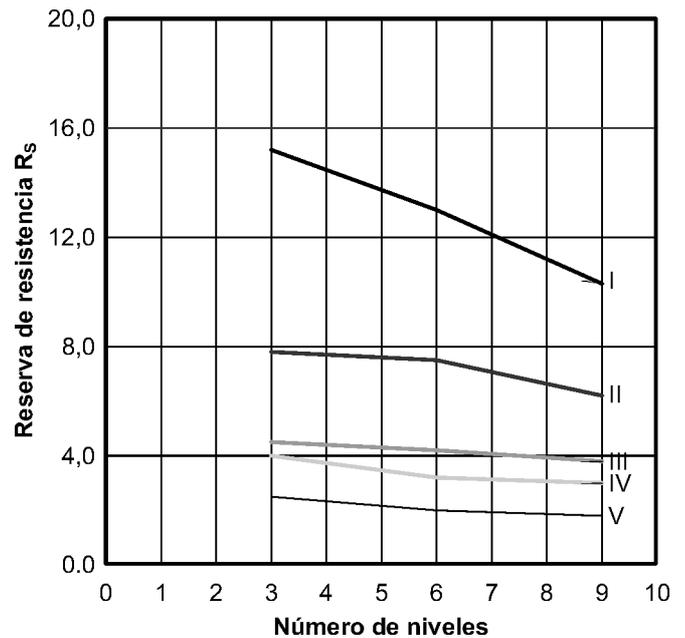


Figura 2. Factores de reducción por reserva de resistencia determinados por Jain y Navin (1995)

Más recientemente, Massumi *et al.* [22] retoman el estudio de la influencia del número de niveles e incluyen el número de vanos en el cálculo de los factores de reserva de resistencia obtenidos a partir de las relaciones de fuerza-desplome resul-

Tabla 4. Factores que influyen en la reserva de resistencia

Causa de la sobrerresistencia	Etapa del proyecto en el cual se incorpora		
	Modelado	Análisis	Diseño
Diferencia entre resistencia actual y nominal de los materiales	X		
Diseño conservador y requerimientos por ductilidad			X
Factores de carga y múltiples casos de carga combinados		X	
Consideración de la torsión accidental		X	
Provisiones para cumplir el estado límite de servicios (flechas)			X
Participación de los elementos no estructurales (losas)	X		
Cumplimiento de las cuantías mínimas de acero			X
Redundancia estructural	X		
Endurecimiento resistente	X		
Efectos del confinamiento	X		
Análisis con base en el período elástico		X	
Diseño controlado por rigidez			X

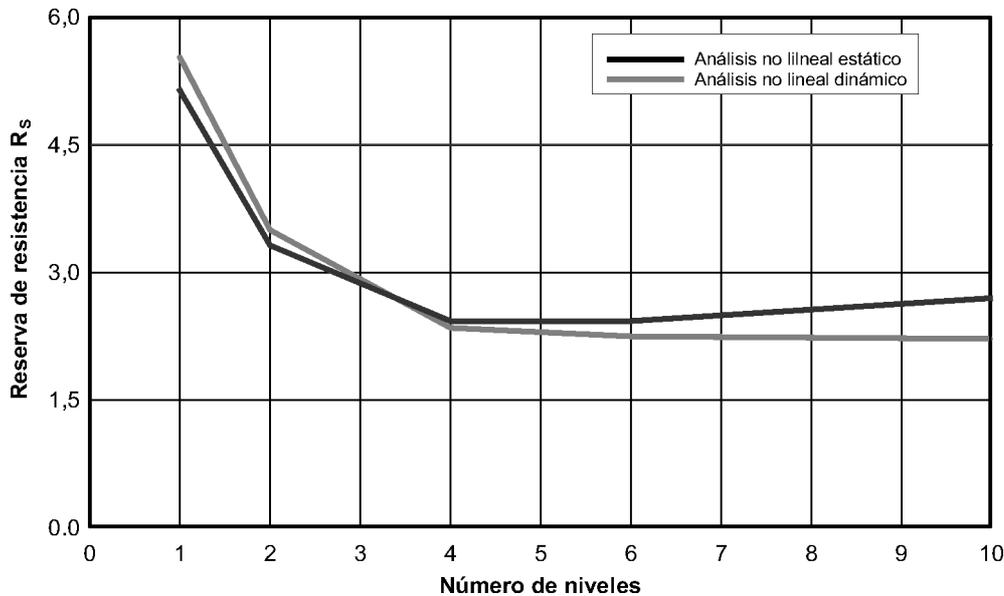


Figura 3. Factor de reducción por reserva de resistencia, determinado por Massumi et al. [22].

tantes del análisis estático y dinámico no lineal. Los resultados obtenidos muestran que el número de vanos o de líneas resistentes verticales son inversamente proporcionales a los valores de reserva de resistencia, lo que contradice los resultados obtenidos de forma probabilista por Bertero y Bertero [23]. En la Figura 3 se muestran factores de reserva de resistencia calculados por Massumi *et al.* [22], apreciando que los valores obtenidos son semejantes a los de la Figura 2 para el caso de edificios diseñados para zonas de alta sismicidad. Además es posible observar que los valores de reserva de resistencia varían muy poco con el método de análisis no lineal aplicado, sea este dinámico o estático, conclusión similar a la obtenida por Elnashai y Mwafi [24].

Otro de los factores a considerar al evaluar la reserva de resistencia es el efecto producido por la ductilidad estructural. Las secciones y el armado resultantes del diseño de una estructura para un alto nivel de ductilidad son mayores que en el caso de que la misma estructura se proyectase para un nivel inferior de ductilidad. De esta forma es posible obtener valores de reserva de resistencia mayores para edificios de alta ductilidad que para edificios de baja ductilidad, Elnashai y Mwafi [24].

Elnashai y Mwafi [24] concluyen que los valores de la reserva de resistencia se deben fundamentalmente a tres fuentes principales: las características resistentes reales de los materiales, la utilización del período elástico en el cálculo de las demandas sísmicas y el proyecto de secciones de pilares utilizando la flexión biaxial. De acuerdo con estos factores, consideran que adoptar valores mínimos de reserva de resistencia igual a 2 conduce a proyectos conservadores.

3.3. Factores de reducción por redundancia estructural

La redundancia estructural ha cobrado valor a partir del comportamiento de edificios de hormigón armado durante los sismos de Northridge (1994) y Kobe (1995). El término

‘redundancia’ dentro del contexto de la ingeniería sismorresistente no debe ser interpretado como superfluo o sobrante, Bertero y Bertero [23]. De todos los factores que definen al factor de reducción R , el que menos ha sido estudiado es el factor de reducción por redundancia, encontrándose entre las investigaciones resultados que en algunos casos son contradictorios, a pesar de que la mayoría de los investigadores coinciden en el efecto beneficioso que tiene la redundancia en la adecuada respuesta e, incluso, en la supervivencia de las estructuras sometidas a acciones sísmicas severas.

La mayoría de las referencias se fundamentan en la investigación de Moses [25] que realizó un estudio estadístico de la respuesta de edificios porticados frente a las acciones de viento, variando el número de líneas resistentes verticales. Posteriormente, Bertero y Bertero [23] retoman el tema adicionando al planteamiento estadístico la influencia del tipo de sismo, pulsativo o armónico, en la posible respuesta de edificios de múltiples grados de libertad. Como ejemplo ilustrativo propusieron el análisis de la respuesta de una estructura de un solo pórtico en comparación con otra de dos pórticos, estableciendo para este último caso la correlación entre la calidad constructiva de cada línea resistente vertical independiente (línea de pilares) mediante el coeficiente

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{1,411}{\sqrt{1 + \rho_v}} \quad (19)$$

En la relación anterior, β_1 es el índice de seguridad para una línea resistente, β_2 es el índice de fiabilidad para dos líneas resistentes y ρ_v es el coeficiente de correlación de calidad constructiva que resume la relación entre la calidad de construcción existente entre dos líneas resistentes verticales de la misma estructura.

Queda claro que para estructuras con un número de líneas resistentes mayor, el coeficiente de correlación de la calidad constructiva se reduce, incrementando la relación del factor

de seguridad de un edificio con varias líneas resistentes respecto al edificio con una sola línea resistente. Valores considerados por Bertero y Bertero [23] indican que, para que una estructura disponga de un factor de reducción por redundancia al menos igual que la unidad, deberá disponer de al menos 4 líneas resistentes verticales (ver la Tabla 5).

Tabla 5. Factores de reducción por redundancia, Bertero y Bertero [23]

Líneas resistentes verticales	Factor de redundancia
2	0,71
3	0,86
4	1,00

Las causas de esta última observación son las siguientes:

- La capacidad de rotación en secciones en las cuales ya ha ocurrido la plastificación
- Se evita el conocido efecto de tamaño por concentración de solicitaciones de grandes magnitudes en un número limitado de secciones o elementos resistentes.

La redundancia de los edificios duales (porticados y con pantallas a cortante) de hormigón armado, analizada de acuerdo con Bertero y Bertero [23], permite concluir que el incremento de líneas resistentes verticales combinando las bondades del sistema dual permite esperar incrementos del factor de resistencia del orden de 24%.

4. LOS FACTORES DE REDUCCIÓN DE RESPUESTA EN LAS NORMAS SISMORRESISTENTES NCSE-02 Y EUROCÓDIGO-8

4.1. Factores de reducción de respuesta en la Norma NCSE-02

La norma sismorresistente española vigente NCSE-02 permite el análisis elástico de estructuras una vez reducidos los

valores espectrales por el coeficiente de respuesta β . El coeficiente de respuesta es función de la ductilidad de proyecto y del porcentaje de amortiguamiento crítico que la misma norma prescribe para los diferentes materiales del sistema estructural

$$\beta = \frac{v}{\mu} \quad (20)$$

donde v es el factor de modificación en función del amortiguamiento, calculado mediante la expresión (21) y μ es el coeficiente de comportamiento por ductilidad. El factor de modificación por amortiguamiento considera la reducción directa del espectro elástico en función de la capacidad de disipación que posee la estructura, según la relación entre el amortiguamiento de 5% que usualmente se encuentra prescrito en otros códigos de diseño y el amortiguamiento real de la estructura, Ω :

$$v = \left(\frac{5}{\Omega} \right)^{0,4} \quad (21)$$

La norma establece los valores del amortiguamiento típicos para estructuras usuales. Los valores del coeficiente de comportamiento por ductilidad se presentan en la Tabla 6.

Si bien la norma NCSE-02 [26] no define directamente el uso de factores de reducción, éstos se expresan aquí como el inverso de los coeficientes de respuesta

$$R = 1/\beta \quad (22)$$

esto permite compararlo con los factores de reducción del EC-8 [27]. De esta forma, se obtienen los valores de R para cada uno de los niveles de ductilidad, que dependen fundamentalmente de la capacidad de las estructuras de disipar energía frente a la acción de cargas cíclicas, mediante elementos estructurales expresamente proyectados para tal fin y acoplados en las dos direcciones principales de la estructura. Los valores de los factores de reducción de respuesta se muestran en las tablas 7, 8 y 9, para ductilidad alta, intermedia y baja, respectivamente.

Tabla 6. Parámetros del factor de reducción previstos en la norma NCSE-02

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad			
		Amortiguamiento (% del crítico)	Alta	Intermedia	Baja
Estructura de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	4,00	4,00	3,00	2,00
	Compartimentada	5,00	4,00	3,00	2,00
Estructura con muros de corte	Compartimentada	6,00	No	No	2,00

Tabla 7. Factor de reducción en la norma NCSE-02, para ductilidad alta

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad μ	Amortiguamiento v	Multiplicador β	Factor reductor R
Estructura de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	4,00	1,09	0,27	3,66
	Compartimentada	4,00	1,00	0,25	4,00

Tabla 8. Factor de reducción en la norma NCSE-02, para ductilidad intermedia

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad μ	Amortiguamiento ν	Multiplicador β	Factor reductor R
Estructura de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	3,00	1,00	0,36	2,74
	Compartimentada	3,00	1,00	0,33	3,00

Tabla 9. Factor de reducción en la norma NCSE-02, para ductilidad baja

Tipo de estructura	Compartimentación	Ductilidad μ	Amortiguamiento ν	Multiplicador β	Factor reductor R
Estructura de hormigón armado o acero laminado	Diáfana	2,00	1,09	0,55	1,83
	Compartimentada	2,00	1,00	0,50	2,00
Estructura con muros de corte	Compartimentada	2,00	0,93	0,46	2,15

En la Figura 4 se muestran los espectros correspondientes a un suelo granular de compacidad media (clasificado como de tipo III), reducidos por el factor de estructura porticada compartimentada, para un nivel de ductilidad alto. Cabe indicar que tanto los espectros elásticos como los inelásticos muestran ramas de aceleración constante para distintos intervalos de períodos, lo que se debe a la aplicación del factor de contribución K contemplado en la norma NCSE-02.

Finalmente, en la Figura 5 se ha representado el factor de reducción de respuesta típico aplicado en la norma NCSE-02. Se distinguen las dos ramas: la primera varía en función del período T y la segunda tiene valores constantes e iguales al valor de la ductilidad estructural μ .

4.2. Factores de reducción de respuesta en el pr EN-1998-1:2003(E) (EC-8)

Al igual que en la mayoría de las normas de diseño sismo-resistente, en el EC-8 [27] se admite el análisis elástico de

las estructuras, partiendo de la reducción de las ordenadas del espectro de diseño elástico mediante la aplicación de factores de reducción. En la Figura 6 se muestran los espectros elásticos de diseño correspondientes a la versión 2003 del EC-8 para riesgo sísmico alto (tipo 1) y para diferentes tipos de suelos.

Los factores de reducción de respuesta son identificados en el EC-8 mediante la letra q. En lo sucesivo, en este trabajo se utilizará la letra R para identificar los factores de reducción, inclusive a los del EC-8. Estos factores de reducción son aplicados a los espectros elásticos de diseño para obtener las aceleraciones de diseño y se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$R = q_0 k_w \geq 1,5 \tag{23}$$

En esta ecuación, q_0 es el factor básico de reducción de respuesta que depende de la tipología estructural predominante, de su regularidad en alzado, así como del valor de la ductilidad de la estructura. Para dicha ductilidad existen dos niveles:

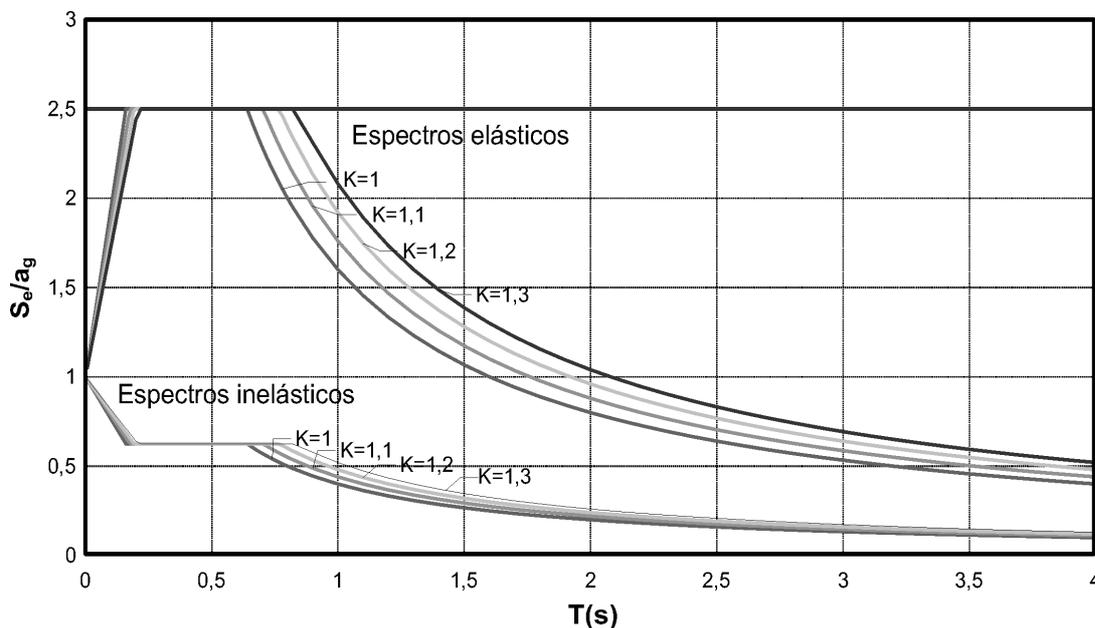


Figura 4. Espectros de diseño elástico e inelásticos para sistemas porticados con alta ductilidad, y para suelo tipo III.

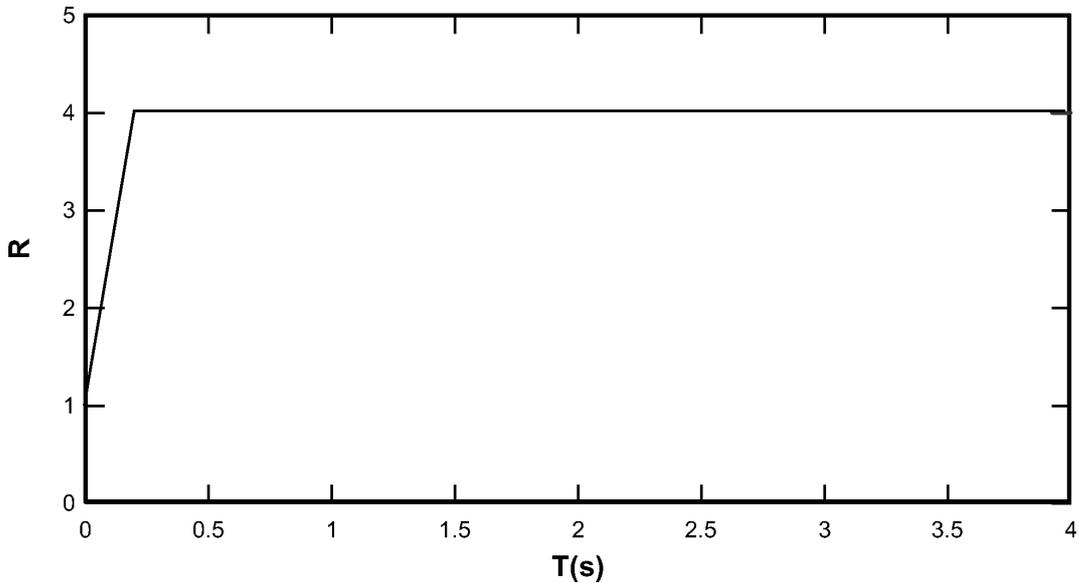


Figura 5. Espectro típico de factor de reducción norma NCSE-02, suelos tipo III.

DCM (clase de ductilidad media) y DCH (clase de ductilidad alta); los valores para ambos niveles se muestran en la Tabla 10. El otro término de la Ecuación (23) es el factor k_w que considera el modo de fallo predominante en estructuras con pantallas de cortante.

En la Tabla 10, el valor α_1 es el coeficiente sísmico correspondiente a la formación de la primera rótula plástica en cualquiera de los elementos de la estructura. El valor α_u es el coeficiente sísmico necesario para que se produzca la inestabilidad de la estructura, en otras palabras, para que se haya alcanzado el fallo de la misma. La relación de estos valores, α_u/α_1 , describe el efecto de la redundancia estructural sobre el factor de reducción de respuesta R. De acuerdo con las especificaciones de la norma EC-8, los valores α_1 y α_u de la Tabla 10 se pueden obtener directamente de la curva de capacidad de la estructura, determinada mediante el análisis inelástico estático. En este caso, α_1 es el valor de la ordenada del cortante en la base de diseño y α_u es el cortante en la base inelástico,

Tabla 10. Valores en el EC-8 para el factor básico de reducción de respuesta q_0

Tipo estructural	DCM	DCH
Sistema porticado, dual o acoplado a muros de corte	$3,0\alpha_u/\alpha_1$	$4,5\alpha_u/\alpha_1$
Sistema con muros de corte	3,00	$4,0\alpha_u/\alpha_1$
Sistema torsionalmente flexible	2,00	3,00
Sistema de péndulo invertido	1,50	2,00

correspondiente al desplome último, de colapso. En consecuencia, la relación α_u/α_1 equivale a un factor de reducción por redundancia. Sin embargo, para los casos en los que no se realiza un análisis inelástico estático, se recomienda aplicar los valores de la Tabla 11, cuando la estructura es predominantemente de pórticos o de pórticos acoplados a pantallas de

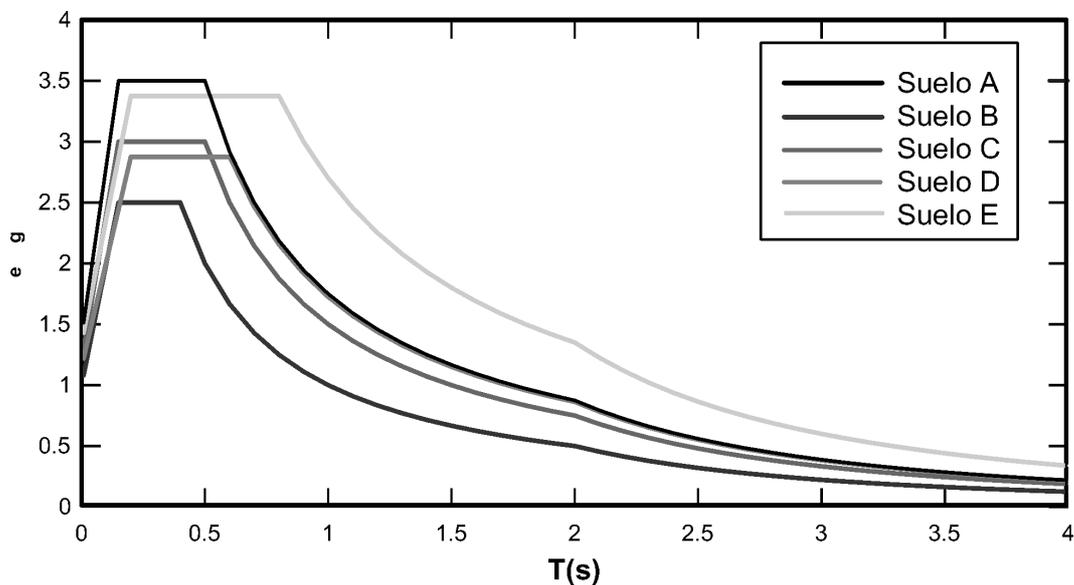


Figura 6. Espectros elásticos de diseño, riesgo sísmico alto (EC-8).

cortante. Cabe señalar que este factor multiplicador tiene en cuenta el efecto de la redundancia estructural, al considerarse valores más altos a medida que se incrementa el número de vanos y el de niveles.

Tabla 11. Valores en el EC-8 para el factor básico de reducción de respuesta

Sistema porticado dual o acoplado a muros de corte	α_u/α_1
Edificación de un solo nivel	1,10
Edificación de múltiples niveles pero de un solo vano	1,20
Edificación de múltiples niveles y múltiples vanos	1,30

Los multiplicadores, adquieren valores entre 1,1 y 1,30, pero presentan una gran dispersión, por lo que en el EC-8 se recomienda, la aplicación del análisis estático no lineal para poder determinar de forma precisa los valores para cada edificio. Si el sistema estructural es predominantemente de pantallas de cortante, los factores de reducción por resistencia R_S , se obtienen de la Tabla 12.

Tabla 12. Valores en el EC-8 para los multiplicadores

Sistema con muros de corte	α_u/α_1
Edificación con sólo dos muros desacoplados por dirección horizontal	1,00
Edificación con otros sistemas desacoplados de muros	1,10
Edificación con sistemas duales o acoplados a muros estructurales	1,20

En la Figura 7 se muestra la curva de capacidad obtenida del análisis estático no lineal, a partir de la cual se obtienen las

relaciones de coeficientes para calcular los factores multiplicadores. En el eje de las abscisas se representan los desplomes del nivel de cubierta expresados en %, normalizados respecto a la altura total del edificio y en el eje de las ordenadas se representa el cortante en la base normalizado respecto al peso sísmico del edificio. Sin embargo el EC-8 limita el valor máximo de los multiplicadores obtenidos aplicando el procedimiento en base al análisis inelástico estático a 1,5.

El otro término del factor de reducción de respuesta tiene que ver con el comportamiento de estructuras con predominio de pantallas de cortante. En este caso se aplica al factor básico, q_0 , un factor de predominio del modo de fallo k_w , que es menor o igual que la unidad y, por tanto penaliza el predominio del fallo por cortante. Las estructuras con pantallas de cortante tienen menor capacidad de desarrollar respuesta dúctil en comparación con las edificaciones porticadas. De esta manera, en la medida en que los muros son más esbeltos, el valor de k_w se aproxima a su cota inferior que es 1/3, sin llegar a alcanzarla ya que el EC-8 lo limita expresamente a 0,5.

Efecto de la irregularidad estructural

La irregularidad en planta es penalizada en el EC-8 con factores multiplicadores iguales a 1, lo que equivale a no aplicarle ningún incremento al factor básico de reducción por resistencia y redundancia. Sin embargo, en el articulado del EC-8 no se distingue entre los diferentes tipos de irregularidad en planta, que determinan de modo diferente los efectos torsionales. De igual forma, los valores de q_0 pueden reducirse hasta un 20% si la estructura analizada presenta irregularidades en alzado; quedando el porcentaje de reducción a juicio del proyectista, dependiendo del grado de irregularidad. Además, se establece un incremento de los valores de q_0 cuando se disponga de un plan especial de calidad, que nunca superará el 20%.

Factores de reducción R . Edificios porticados

En las tablas 13 y 14 se muestran los factores de reducción para edificios porticados teniendo en cuenta los factores bási-

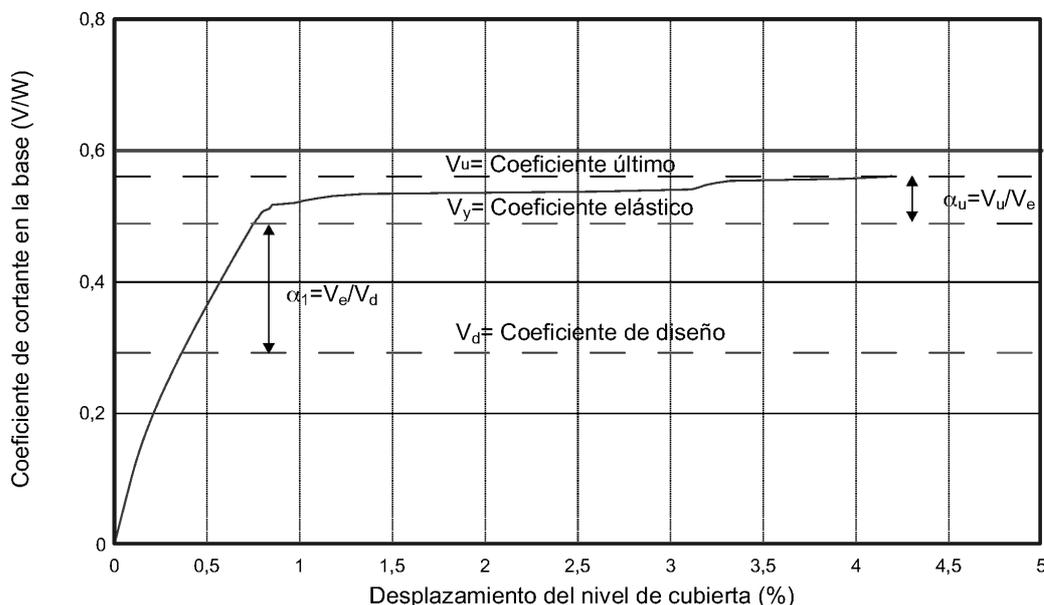


Figura 7. Determinación de los coeficientes multiplicadores a partir de la curva de capacidad.

Tabla 13. Factores de reducción para estructuras porticadas con nivel de ductilidad alto

	Factor básico q_0	Factor de reducción por redundancia a_u / a_1	Factor por modo predominante de fallo K_w	Irregulares							
				regulares		en planta		en alzado		planta y alzado	
				q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)
Un solo nivel	4,50	1,10	1,00	4,95	5,94	4,50	5,40	4,13	4,95	3,75	4,50
Múltiples niveles un solo vano	4,50	1,20	1,00	5,40	6,40	4,50	5,40	4,50	5,40	3,75	4,50
Múltiples niveles Múltiples vanos	4,50	1,30	1,00	5,85	7,02	4,5	5,40	4,88	5,85	3,75	4,50

SPC: Edificio sin proyecto de control de calidad.

CPC: Edificio con proyecto de control de calidad.

cos de cálculo asignados de acuerdo con el nivel de ductilidad estructural (alto o medio), la existencia de irregularidades en planta y en alzado y una combinación de ambas. Se aplican los valores extremos sugeridos en el EC-8, entendiéndose que entre los máximos y los mínimos se encuentra un rango de valores que, tal como se ha indicado, quedan a juicio del proyectista. Finalmente, se aplican incrementos a los factores de reducción en virtud de la existencia de planes especiales de control de calidad en la elaboración del proyecto. En las tablas 13 y 14, las siglas CPC y SPC significan que el proyecto cuenta o no, respectivamente, con un plan de control de calidad.

Factores de reducción R. Edificaciones con pantallas de cortante

Para este tipo estructural, que comprende una amplia gama de configuraciones, inclusive combinaciones con estructuras porticadas, se presenta una variante que consiste, en la aplicación de un factor corrector que varía en función del modo de

fallo predominante. En las tablas 15, 16 y 17, se muestran los valores correspondientes a estructuras con pantallas de cortante para ductilidades bajas y altas, adoptándose el valor de $k_w = 1$ para los casos con predominio de fallo por flexión y de $k_w = 0,5$ que es la cota mínima norma para edificios con fallos por cortante.

La aplicación de los factores de reducción del EC-8 no conduce a valores únicos para una ductilidad estructural, sino que proporciona un rango de valores que dependen, por un lado, de la capacidad para disipar energía que poseen las estructuras y de su reserva de resistencia y, por el otro, de los controles de diseño por parte del proyectista. A la larga, dichos controles aseguran el cumplimiento de las prescripciones de proyecto complementarios a la norma, lo que conduce al incremento de la capacidad disipativa de la estructura.

Los factores típicos de reducción contemplados en el EC-8 se muestran en la Figura 8, para estructuras porticadas y una combinación de suelo rocoso (tipo A). Se observa que un

Tabla 14. Factores de reducción para estructuras porticadas con nivel de ductilidad bajo

	Factor básico q_0	Factor de reducción por redundancia a_u / a_1	Factor por modo predominante de fallo K_w	Irregulares							
				regulares		en planta		en alzado		planta y alzado	
				q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)
Un solo nivel	3,00	1,11,200	1,00	3,30	3,96	3,00	3,60	2,75	3,30	2,50	3,00
Múltiples niveles un solo vano	3,00	1,30	1,00	3,60	4,32	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00
Múltiples niveles Múltiples vanos	3,00		1,00	3,9	4,68	3,00	3,60	3,25	3,90	2,50	3,00

SPC: Edificio sin proyecto de control de calidad.

CPC: Edificio con proyecto de control de calidad.

Tabla 15. Factores de reducción para estructuras con pantallas de cortante con nivel de ductilidad bajo

	Factor básico q_0	Factor de reducción por redundancia a_u / a_1	Factor por modo predominante de fallo K_w	Irregulares							
				regulares		en planta		en alzado		planta y alzado	
				q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)
Sólo dos muros desacoplados	4,00	1,00	1,00	4,00	4,80	4,00	4,80	3,33	4,00	3,33	4,00
Otros sistemas desacoplados de muros	4,00	1,10	1,00	4,40	5,28	4,00	4,80	3,67	4,40	3,33	4,00
Sistemas duales o acoplados a muros	4,00	1,20	1,00	4,80	5,76	4,00	4,80	4,00	4,80	3,33	4,00

SPC: Edificio sin proyecto de control de calidad.

CPC: Edificio con proyecto de control de calidad.

Tabla 16. Factores de reducción para estructuras con pantallas de cortante, con nivel de ductilidad alto, modo de fallo predominante por cortante.

	Factor básico q_0	Factor de reducción por redundancia a_u / a_1	Factor por modo predominante de fallo K_w	Irregulares							
				regulares		en planta		en alzado		planta y alzado	
				q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)
Sólo dos muros desacoplados	4,00	1,00	0,50	2,00	2,40	2,00	2,40	1,67	2,00	1,67	2,00
Otros sistemas desacoplados de muros	4,00	1,10	0,50	2,20	2,64	2,00	2,40	1,83	2,20	1,67	2,00
Sistemas duales o acoplados a muros	4,00	1,20	0,50	2,40	2,88	2,00	2,40	2,00	2,40	1,67	2,00

SPC: Edificio sin proyecto de control de calidad.

CPC: Edificio con proyecto de control de calidad.

Tabla 17. Factores de reducción para estructuras con pantallas de cortante, con nivel de ductilidad alto, modo de fallo predominante por flexión.

	Factor básico q_0	Factor de reducción por redundancia a_u / a_1	Factor por modo predominante de fallo K_w	Irregulares							
				regulares		en planta		en alzado		planta y alzado	
				q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)	q (NPC)	q (CPC)
Sólo dos muros desacoplados	3,00	1,00	1,00	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00	2,50	3,00
Otros sistemas desacoplados de muros	3,00	1,10	1,00	3,30	3,96	3,00	3,60	2,75	3,30	2,50	3,00
Sistemas duales o acoplados a muros	3,00	1,00	1,00	3,60	4,32	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00

SPC: Edificio sin proyecto de control de calidad.

CPC: Edificio con proyecto de control de calidad.

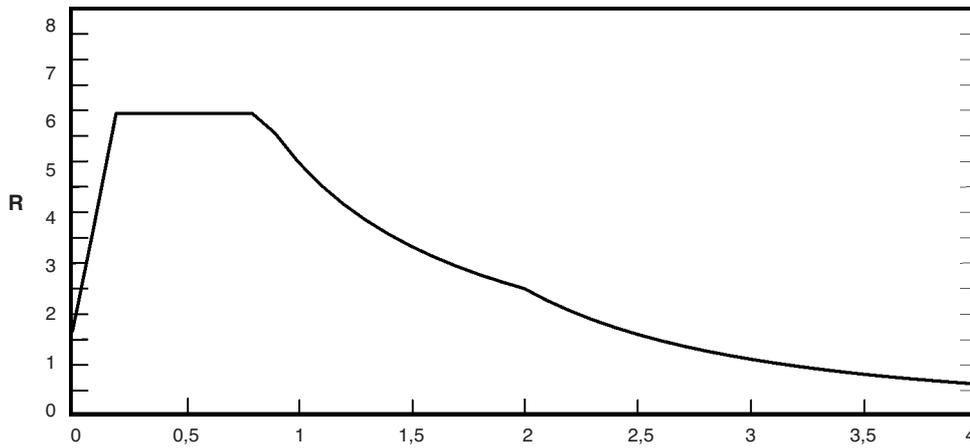


Figura 8. Espectros de factores de reducción.

espectro de factores de reducción presenta tres ramas: una primera rama creciente, una segunda constante, y una tercera que se reduce una vez alcanzado el período máximo de aceleración constante del espectro elástico de diseño. Además, el EC-8 define un valor mínimo de aceleración de diseño para los períodos altos, razón por la que se observa un cambio de pendiente en la rama descendente del espectro de factores de reducción a partir del período de 2 segundos.

5. COMPARACIÓN DE LOS FACTORES R DE LA NORMA NCSE-02 Y DEL EC-8

El primer aspecto a resaltar es que sólo en el EC-8 existe una referencia explícita a un factor básico de ductilidad, que depende de la ductilidad estructural R_{μ} . Además, los factores de reducción R , son afectados por coeficientes multiplicadores que varían de acuerdo con la redundancia estructural y con los materiales de la estructura.

En la norma NCSE-02 los factores de reducción tienen un componente de reducción que dependen exclusivamente de la ductilidad, R_{μ} , para la cual se fijan niveles de diseño que no son más que un marco de especificaciones mínimas que se deben cumplir en la etapa de proyecto.

La NCSE-02 hace una referencia directa a la influencia del amortiguamiento en el cálculo de los factores de reducción. Sin embargo recomienda el valor promedio para el comportamiento de las diferentes estructuras, clasificadas de acuerdo con sus materiales, sin hacer referencia a la influencia de elementos no estructurales tales como la densidad y distribución de la mampostería que se ha demostrado altera los valores esperados del amortiguamiento de las estructuras.

La consideración de la amplificación que experimenta el movimiento sísmico cuando atraviesa distintos tipos de suelos se encuentra de forma explícita en el EC-8, al adoptar valores de factores de amplificación dinámica β que dependen de las características geotécnicas, generalmente representadas por la

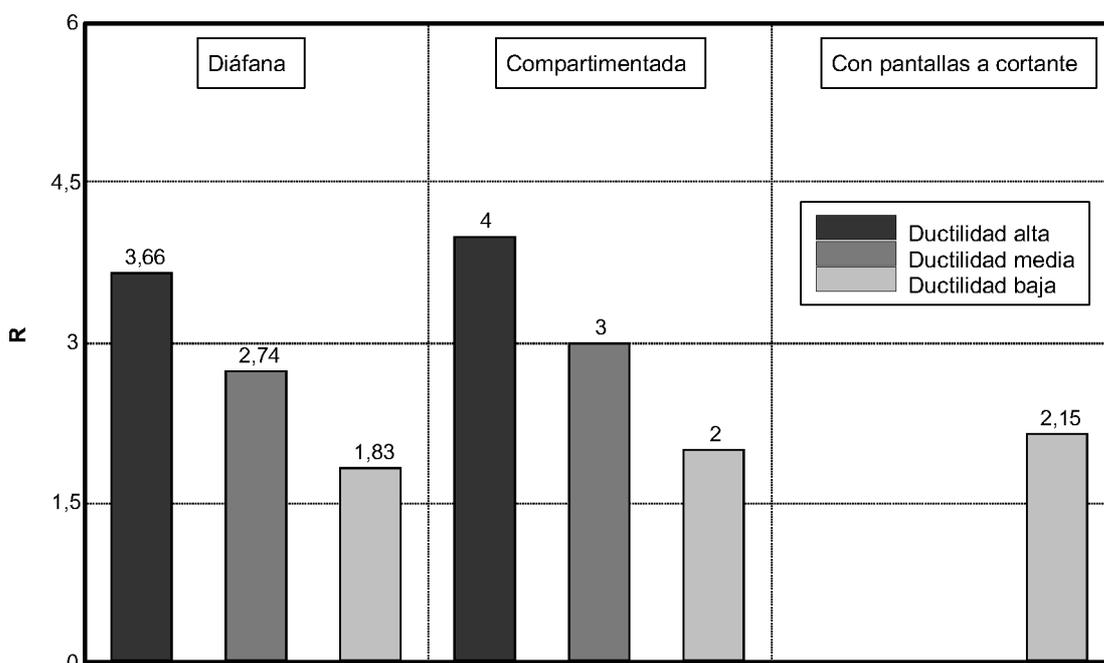
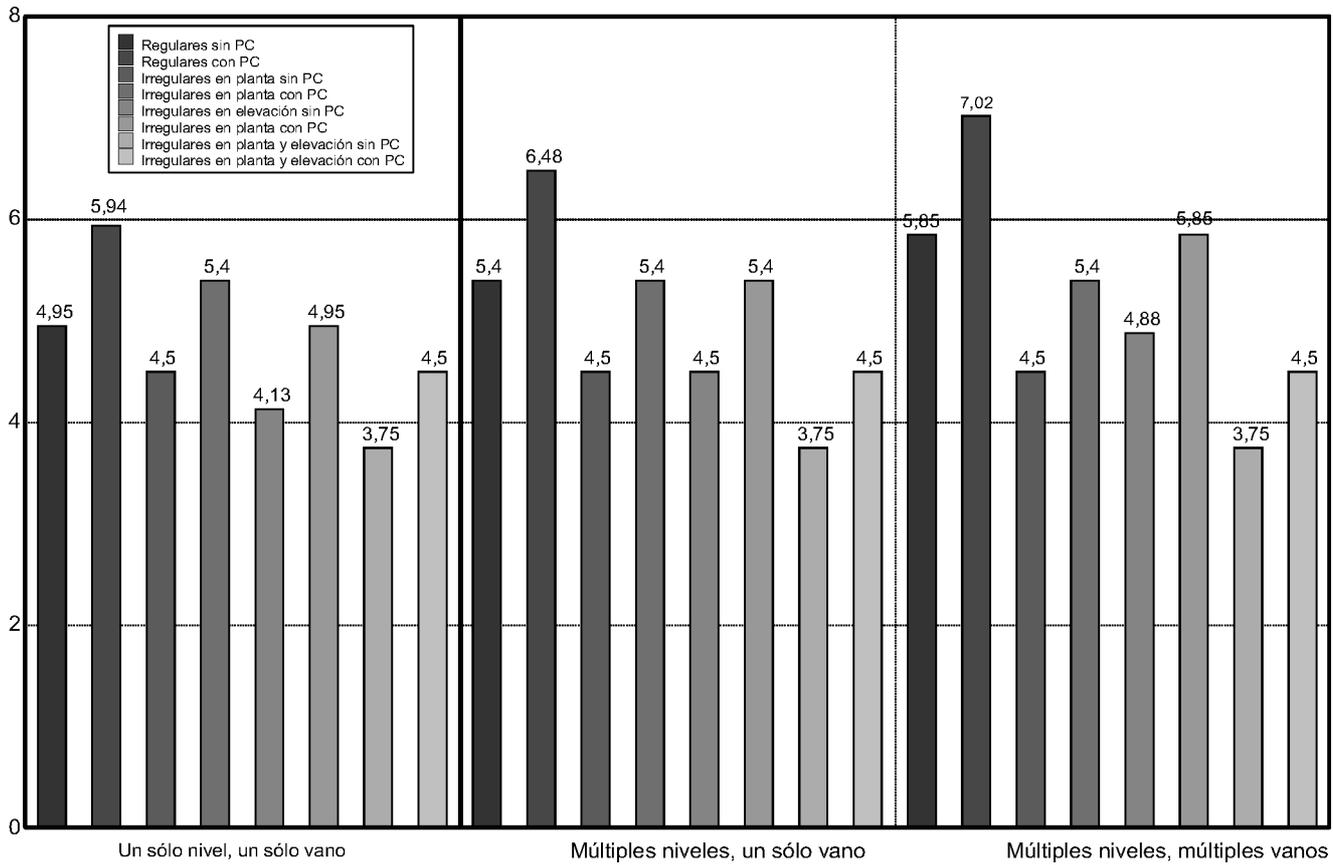


Figura 9. Factores de reducción de la norma española NCSE-02.



PC: Proyecto de control de calidad

Figura 10. Factores de reducción del EC-8, para estructuras de hormigón armado, de acuerdo a la regularidad, redundancia y ductilidad global

velocidad de ondas de cortante y por los espesores de los estratos. La NCSE-02 presenta valores máximos como consecuencia de la amplificación, ajustando por esta causa el rango de valores de los períodos para los que se tiene aceleración constante, que se ensancha de acuerdo con el factor de contribución K del emplazamiento (véase la Figura 4).

Los valores de los factores de reducción de la norma NCSE-02 son bajos en comparación con los del EC-8; compárense, por ejemplo, los valores de las Figuras 9 y 10. En esta última se favorece, de forma explícita, la influencia de la redundancia estructural, expresada en función del número de niveles y vanos, además de que se valora favorablemente la regularidad en planta y alzado (ver la Figura 10).

En cuanto a los valores de los factores, es interesante notar que el EC-8 los limita en las estructuras con períodos largos (superiores a los 2 s) limitando explícitamente la aceleración de diseño inelástico a un valor mínimo de 0,2 veces la aceleración espectral normalizada. Este último aspecto hace que el espectro de factores de reducción tenga cuatro ramas bien diferenciadas: la de los períodos cortos que corresponde a la regla de igual energía; la de los períodos intermedios con aceleraciones constantes; una tercera rama decreciente, proporcional a la rama decreciente del espectro elástico; y una última rama que no decrece de la misma forma que la tercera, consecuencia de la cota inferior de las aceleraciones de diseño.

El período característico para el cual se produce la transición entre la rama creciente (sensible al período) y la rama horizontal (sensible la ductilidad), presenta cierta uniformidad en ambas normas. Estos valores se encuentran entre 0,2 s y 0,4 s, que corresponden a períodos típicos obtenidos de los espectros de respuesta calculados con registros sobre suelos rocosos o muy duros. Sin embargo, recientes trabajos han demostrado la dependencia del período característico respecto al período del suelo.

Finalmente, se reconoce la importancia que se da en las normativas analizadas a la relación que existe entre el valor de la ductilidad estructural y el nivel de armado que se aplica a la estructura. Por ejemplo, la norma NCSE-02, por permitir ciertas irregularidades de la estructura y detalles de armado menos rigurosos para las secciones y los nudos, establece niveles máximos de ductilidad que se encuentran por debajo de los especificados en el EC-8.

Las estructuras cuya configuración permite clasificarlas como péndulos invertidos, son consideradas en ambas normas como estructuras de baja ductilidad, para las que los factores de reducción son iguales a 2.

Ambas normas incorporan aspectos sugeridos en estudios recientes, tales como la incorporación de los factores de redundancia estructural. Ejemplo de esto son los coeficientes que incrementan de los factores de reducción del EC-8, cuan-

do las estructuras cumplen con ciertas características de redundancia de elementos resistentes verticales. La regularidad estructural es considerada explícitamente en el EC-8.

6. CONCLUSIONES

Se verifica la incorporación en las normas de diseño sismo-resistente de recientes avances en la determinación de los factores de reducción de respuesta. Dentro de las más relevantes se encuentran la incorporación de factores de reducción dependientes de la ductilidad, de la reserva de resistencia y de la redundancia estructural. Estos avances recientes requieren una mejora en su aplicación, como por ejemplo, determinar valores apropiados para tipos estructurales, tipos de materiales o rangos de períodos.

Se ha constatado en las normas NCSE-02 y EC-8, la aplicación de factores de reducción de respuesta mayores para edificios porticados de acero que para edificios porticados de hormigón armado. Sin embargo, se observa la ausencia de factores de reducción recomendados para edificios mixtos de pórticos y pantallas de cortante. Tampoco se suministran factores de reducción para edificios cuya estructura predominante sea únicamente de pantallas de cortante.

Las modificaciones normativas dan indicios de que los factores de reducción de respuesta han sido disminuidos progresivamente. Por ejemplo, los factores de reducción del EC-8 no superan el valor de 7,02 para el caso de estructuras porticadas, mientras que en otras normas los valores para tipologías estructurales semejantes son de 8,5 (UBC-97 e IBC-2003).

La racionalización de los factores de reducción de respuesta, propuesta en el ATC-95, implica que el proyectista estructural se involucre en la determinación del factor de reducción al aplicar al espectro de diseño, al tener la posibilidad de escoger los factores que se adapten a las características del edificio que proyecta.

Se incluyen penalizaciones a las irregularidades estructurales, ignoradas en las anteriores versiones de las normas sismo-resistentes en la determinación de los factores de reducción de respuesta.

A pesar de la incorporación de los factores de reducción por reserva de resistencia y redundancia, es necesario hacer más transparente la relación entre éstos y aspectos relevantes del proyecto tales como la regularidad, la tipología estructural y el grado de hiperestatismo.

REFERENCIAS

[1] Veletsos, A.S. y Newmark, N.M., Effect of Inelastic behavior on the response of simple systems to Earthquake Motions. *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering*. Vol II Tokyo, 895-912, 1960.

[2] Ordaz, M y Pérez-Rocha, L. (1998). Estimation of strength-reduction factors for elasto-plastic systems: a new

approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1998; 27: 889-901.

[3] Structural Engineering Association of California (SEAOC). *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*. Sacramento, 1959.

[4] International Building Conference of Building Officials., *Uniform Building Code (UBC-97)*. Whittier, California, 1997.

[5] Applied Technology Council, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings. *Report ATC-03-06*. Redwood City, 1978.

[6] International Building Conference of Building Officials., *International Building Code (IBC-2003)*. Whittier, California, 2003.

[7] Bertero, V., Evaluation of response reduction factors recommended by ATC y SEAOC. *Proceedings 3rd U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Earthquake Engineering Research Institute. Oakland.:1663-1673, 1986.

[8] Whittaker, A. Hart, G. y Rojahn, C., Seismic response modification factors. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 125, N° 4: 438-444, 1999.

[9] Whittaker, A, Uang, C.-M. y Bertero, V., Earthquake simulation test associated studies of a 0.3 scale model of a six-storey eccentrically braced steel structure. *Rep UCB/EERC-87/02*. University of California, 1987.

[10] ATC. (Applied Technology Council), Structural response modification factors. *Report ATC-19*. Redwood City, 1995.

[11] Nassar, A. y Krawlinker, H., Seismic demands for SDOF and MDOF systems. *Rep 95, the John Blume Earthquake Engineering Center*. Stanford University, 1991.

[12] Vidic, T., Fajfar, P., Fischinger, M., Consistent inelastic design spectra: strength and displacement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 23: 507-521, 1994.

[13] Miranda, E., y Bertero, V. V., Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 10(2), 357-379, 1994.

[14] Lee, L.H. Han, S.W. Oh, Y.H., Determination of ductility factor considering different hysteretic models. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 28: 957-977, 1999.

[15] Chakraborti, A. y Gupta V., Scaling of strength reduction factors for degrading elasto-plastic oscillators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 34: 189-206, 2004.

[16] Vielma J.C., Lobo, W. y Rivero, P., Hysteretic Determination of the Response Factors R_l According to Structural Types. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper 3469, Vancouver, 2004.

- [17] Dolšek, M. y Fajfar, P., Inelastic spectra for infilled reinforced concrete frames. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 33: 1395-1416, 2004.
- [18] Osteraas, J.D. y Krawlinker, H., Strength and ductility considerations on seismic design. *Rep 90, the John Blume Earthquake Engineering Center*. Stanford University, 1990.
- [19] Uang, C.M. y Maarouf, A., Safety and economy considerations of UBC seismic force reduction factors. *Proceedings of 1993 National Earthquake Conference*. Central United States Earthquake Consortium. Memphis: 121-130, 1993.
- [20] Hwang, H. y Shinozuka, M., Effect of large earthquake on the design of buildings in eastern United States. *Proceedings 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. Earthquake Engineering Research Institute. Oakland.223-231, 1994.
- [21] Jain, S. and Navin R., Seismic overstrength in reinforced concrete frames. *Journal of Structural Engineering*. Vol 121, N° 3, 580-584, 1995.
- [22] Massumi, A., Tasnimi, A., Saatcioglu, M. Prediction of seismic overstrength in concrete moment resisting frames using incremental static and dynamic analyses. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Paper 2026. Vancouver, 2004.
- [23] Bertero, R. y Bertero, V., Redundancy in earthquake-resistant design. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 125, N° 11: 81-88, 1999.
- [24] Elnashai, A. y Mwafi, A., Overstreight and force reduction factors of multistory reinforced-concrete buildings. *Structural design of tall buildings*. 11: 329-351, 2002.
- [25] Moses, F., Reliability of structural systems. *Journal of structural Division*. ASCE, 100 (9), 1974.
- [26] NCSE-2002. *Norma de construcción sismorresistente*. BOE N° 244. 2002. Madrid.
- [27] Comité Européen de Normalisation (CEN), *Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance*. Brussels, 2003.