



Propuesta de factores de modificación del espectro de NSR-10 para valores de amortiguamiento diferentes al 5%

Proposal of modification factors of NSR-10's spectrum for damping values different to 5%

Carlos M Piscal A ⁽¹⁾, Francisco López A ²

⁽¹⁾ Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia.

⁽²⁾ Profesor, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Tecnología de la Arquitectura, Barcelona, España.

Dirección para correspondencia: cpiscal@unisalle.edu.co

TEMA B/ Sistemas de aislamiento y Disipación de Energía

Resumen

El aislamiento sísmico de base posee dentro de sus ventajas un notable incremento del amortiguamiento. Para el diseño de edificaciones que incorporan esta técnica, se hace necesario entonces, emplear espectros de diseño modificados en función del amortiguamiento que brinda el sistema de aislación. El Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10), contiene un espectro de diseño definido para un amortiguamiento del 5% respecto al crítico, valor que es totalmente razonable y compatible con el comportamiento esperado para edificaciones con base fija, sin embargo, no presenta ningún factor de modificación para el caso de edificaciones cuyo valor de amortiguamiento sea superior o inferior al 5%. Las edificaciones hasta el día de hoy diseñadas y construidas en el país, deben haber empleado los factores de modificación del espectro definidos en los códigos de referencia recomendados por NSR-10, tal es el caso de ASCE 7 o FEMA 450. Los factores de modificación por amortiguamiento dependen de diversas características locales, entre ellas la amenaza sísmica; por lo cual, emplear factores definidos para otros países requiere de un estudio detallado de su aplicabilidad, es por esto que en este trabajo se proponen nuevas expresiones para el cálculo de dichos factores considerando la amenaza local de Colombia.

Palabras-clave: Aislamiento sísmico de base, Espectro de diseño, Factor por amortiguamiento, NSR-10.

Abstract

The base seismic isolation has, like one of its advantages, a notable increase in the damping. For the design of buildings that incorporate this technique, it is therefore necessary to use modified design spectrums based on the damping provided by the isolation system. The Colombian Regulation of Earthquake Resistant Buildings (NSR-10), contains a design spectrum for a damping of 5% of critical, a value that is completely reasonable and compatible with the expected behavior for buildings with a fixed base, however, NSR-10 does not presents modification factor for the case of buildings whose damping value is greater than or less than 5% of critical. The buildings up to now designed and built in the country must have used the spectrum modification factors defined in the reference codes recommended by NSR-10, such as ASCE 7 or FEMA 450. Modification factors by damping depend on various local characteristics, including the seismic hazard; therefore, using factors defined for other countries requires a detailed study of its applicability, due to aforementioned, in this work new expressions are proposed for the calculation of such factors considering the local hazard of Colombia.

Keywords: Seismic isolation, Design Spectrum, Damping factor, NSR-10.

1. Introducción

Los sistemas de control brindan a las estructuras un incremento en el nivel de amortiguamiento y generalmente un nivel de desempeño más alto. Sistemas pasivos de control como el aislamiento de base y los disipadores de energía inducen incrementos de amortiguamiento hasta del 40% respecto al crítico, por otra parte, un nivel de desempeño más alto indica un amortiguamiento estructural inferior al 5%. A nivel mundial códigos sismo resistentes de referencia como ASCE 7 (ASCE 7-16, 2016) y el Eurocódigo (EN-1998-2, 2004) han definido la amenaza sísmica mediante espectros desarrollados para un valor de amortiguamiento de 5% respecto al crítico, sin embargo, han incorporado una serie de tablas o expresiones para representar el efecto que tendría una posible variación en dicho valor.

El Reglamento NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) actualmente no contiene ninguna expresión o factor para tener en cuenta el efecto de la variación del amortiguamiento, por lo cual las estructuras que hasta el día de hoy han sido diseñadas y construidas en el País aplicando estas tecnologías, deben haber empleado los factores dispuestos en los códigos de referencia (ASCE 7-10, 2010; FEMA, 2004), de acuerdo a las recomendaciones estipuladas en los numerales A.3.8 y A.3.9 de NSR-10.

Un considerable número de investigaciones a nivel mundial (Bommer & Mendis, 2005; Cameron & Green, 2007; Cardone, Dolce, & Rivelli, 2009; Hatzigeorgiou, 2010; Lin & Chang, 2004; Lin,

Miranda, & Chang, 2005) han estudiado y demostrado la dependencia de los factores por amortiguamiento, de parámetros como: el periodo fundamental de la estructura, la duración del evento, la distancia del sitio al hipocentro, la magnitud del sismo, el tipo de suelo, entre otros. Resaltando la variación que en dichos parámetros se puede presentar en función de la zona para la cual se los esté estimando.

Los factores en estudio generalmente son derivados a partir de registros sísmicos históricos, que caracterizan la sismicidad local, sin embargo, en numerosas ocasiones esta opción es inviable, debido a que el número disponible de tales registros es insuficiente; esto generalmente ocurre cuando la sismicidad de una zona es moderada y la red sismológica se puede catalogar como reciente o limitada. Otra alternativa para su estimación, es considerar el uso de registros contenidos en bases de datos a nivel mundial, debidamente escalados a la definición de la amenaza local, sin embargo esta opción contiene dos inconvenientes a) las características de los sismos seleccionados pueden afectar el factor estimado y b) se requiere ajustar los registros en todo el rango de periodos, debido a que la estimación del factor incluye la consideración de este último parámetro. Una tercera alternativa, plasmada en los códigos sismo resistentes a nivel mundial y aceptada para el diseño o verificación estructural, consiste en hacer uso de los denominados sismos artificiales.

Debido a lo anteriormente mencionado, se hace indispensable definir un factor por amortiguamiento específicamente calculado con las características locales de amenaza de Colombia, y debido a la escases de registros reales que la representan en su totalidad, se propone en este trabajo una metodología para hacer uso de los sismos artificiales.

2. Metodología Propuesta

La metodología propuesta es basada en (Saez Uribe, 2014), adaptándola al uso de sismos artificiales. El trabajo aquí desarrollado considera dos factores de modificación denominados B_a y B_d , definidos para modificar los espectros de aceleración y desplazamiento (o pseudo aceleración) incorporados en NSR-10 y estipulados para un amortiguamiento del 5% respecto al crítico.

Para la estimación de los parámetros mencionados se emplearon las siguientes expresiones:

$$B_a(\zeta, T) = \frac{S_a(\zeta, T)}{S_a(0.05, T)} \quad B_d(\zeta, T) = \frac{S_d(\zeta, T)}{S_d(0.05, T)} = \frac{PS_a(\zeta, T)}{PS_a(0.05, T)} \quad (1)$$

Donde cada uno de los valores de aceleración S_a y desplazamiento S_d , para los diferentes periodos (T) y valores de amortiguamiento (ζ) considerados, se obtuvieron mediante análisis dinámicos cronológicos de sistemas elásticos de un grado de libertad.

La propuesta consiste en estimar los factores de modificación por amortiguamiento, combinando información de registros naturales de eventos sísmicos de relevancia disponibles en el País, junto con acelerogramas artificiales construidos para suplir la falta de los primeros. Si los acelerogramas artificiales son generados para un conjunto de espectros de diseño correspondientes a los tipos de suelo y a las regiones sísmicas contempladas en NSR-10, se contara con un número de sismos artificiales representativos de la amenaza para Colombia.

2.1 Conjunto de registros reales empleados

De la base de datos del Servicio Geológico Colombiano Nacional (SGC, 2014), se seleccionaron un conjunto de acelerogramas registrados en el País (Piscal A, Lopez Almansa, 2018). Los criterios de selección definidos fueron: magnitud local superior o igual a 6.0 y distancia epicentral menor a 210 Km. Al no estar disponible la información acerca del tipo de suelo donde los eventos fueron registrados, este parámetro fue tomado del estudio de (Benavent-Climent, López-Almansa, & Bravo-González, 2010). Cada registro fue procesado y se hizo una corrección de línea base. Los registros seleccionados fueron escasos (10) y en su mayoría pertenecen a la región número 5 definida en NSR-10.

2.2 Acelerogramas artificiales generados

Para representar la amenaza sísmica de Colombia, junto con el efecto que tiene el tipo de suelo en la misma, se construyeron 50 espectros de diseño teniendo en cuenta las 10 regiones en las que se encuentra dividido el País (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) y los 5 tipos de suelo que considera NSR-10 (A-E). A partir de la anterior información, para cada espectro se ajustaron 7 acelerogramas en todo el rango de periodos, con una duración de 20s (NUREG-0800, 2014), una función de variación amplitud-tiempo acorde a lo descrito en (Saragoni & Hart, 1973), una amplitud máxima correspondiente a 4s y una amplitud al instante final correspondiente al 5% de la máxima.

2.3 Análisis dinámico cronológico

Para múltiples sistemas elásticos de un grado de libertad (SDOF), un análisis dinámico cronológico fue desarrollado, empleando cada acelerograma natural y artificial. Los valores de periodos naturales y amortiguamientos considerados para el SDOF variaron desde 0.01 a 4 s (3990 valores), y de 0.5% a 50% (19 valores) respectivamente. Considerando los anteriores valores y teniendo en cuenta la cantidad de acelerogramas empleados en este trabajo, se llevaron a cabo cerca de 26'550.000 análisis, apoyándose en la creación de algoritmos que ayudaran a tal proceso. Se obtuvieron como resultados los valores de S_a y S_d para cada amortiguamiento, periodo y acelerograma empleado, a partir de estos se obtuvieron los factores B_a y B_d respectivamente.

3. Resultados

La Figura 1 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para B_d y B_a , el ejemplo corresponde al caso de acelerogramas artificiales ajustados al espectro desarrollado para la región 7, suelo tipo A, empleando para el análisis un amortiguamiento del 30%. Cada figura muestra las curvas de cada uno de los 7 acelerogramas ajustados y adicionalmente se presenta el promedio de las mismas, se evidencia que hay una dispersión moderada.

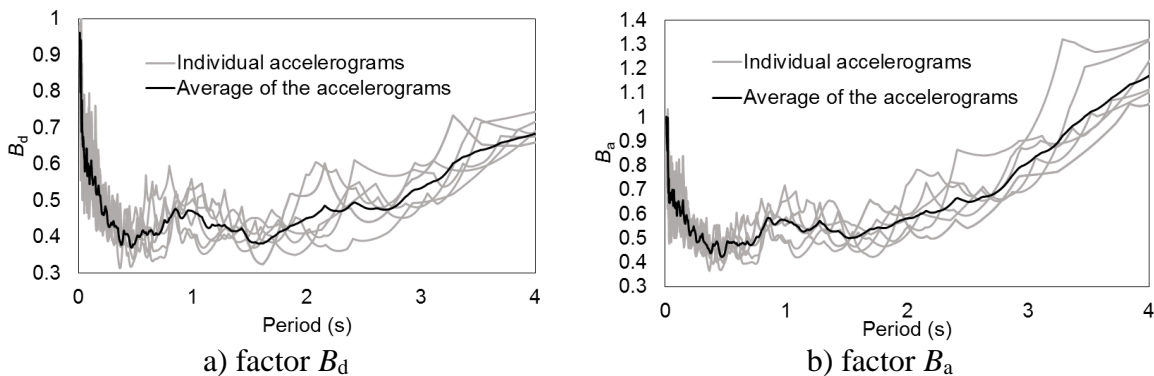


Figura 1. Gráficas para el factor B_d y B_a para 7 acelerogramas artificiales. Zona 1, suelo A y amortiguamiento del 30%

Los resultados evidencian una baja influencia de la región y del tipo de suelo considerados, en comparación a otros parámetros como el periodo natural y el amortiguamiento, por lo cual se promediaron los valores obtenidos para las diferentes regiones y los diferentes tipos de suelos estudiados. La Figura 2 resume lo anteriormente descrito para el caso de los acelerogramas artificiales.

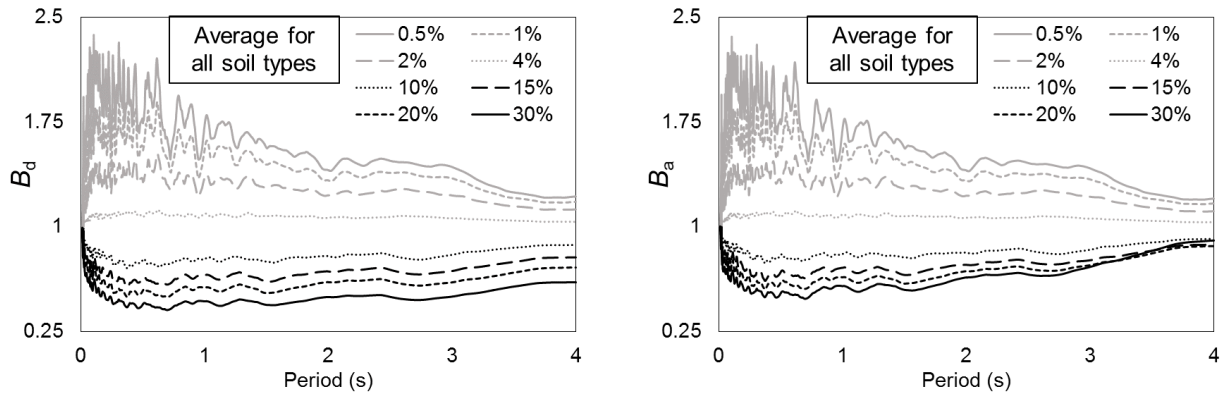


Figura 2. Gráficas para el factor B_d y B_a , promedio de todas las regiones y tipos de suelo

Para cada curva definida en la Figura 2, utilizando regresiones lineales y no lineales, se ajustaron una serie de expresiones que simplifican su estimación. Dichas expresiones permiten calcular los factores B_a y B_d en función del amortiguamiento y periodo considerados. La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos

Tabla 1. Expresiones derivadas para B_d y B_a

| | | | |
|---|---|--|--|
| $\zeta > 0.05$ $B_d = 1 - \frac{a T^b}{(T+1)^c}$ | a | $1.621 + 0.4935 \ln \zeta$ | |
| | b | 0.3683 | |
| | c | 0.9200 | |
| $\zeta > 0.05$ $B_a = d + e T$ | $T \leq 0.04 \text{ s}$ | d | 1 |
| | | e | $-789.9 \zeta^5 + 1445 \zeta^4 - 1071 \zeta^3 + 419.7 \zeta^2 - 100.6 \zeta + 2.938$ |
| | $0.04 \text{ s} < T \leq 0.5 \text{ s}$ | d | $-0.165 \ln \zeta + 0.4729$ |
| | | e | $-139 \zeta^5 + 248.6 \zeta^4 - 176.7 \zeta^3 + 63.64 \zeta^2 - 11.83 \zeta + 0.521$ |
| | $0.5 \text{ s} < T \leq 4 \text{ s}$ | d | $0.2202 \zeta^{-0.532}$ |
| | | e | $-0.2028 \zeta^2 + 0.4355 \zeta - 0.0026$ |
| $\zeta < 0.05$ $B_d = 1 - \frac{a T^b}{(T+1)^c}$ | a | $3.789 + 1.238 \ln \zeta$ | |
| | b | 0.4685 | |
| | c | $0.5941 - 0.2510 \ln \zeta$ | |
| $\zeta < 0.05$ $B_a = 1 - \frac{a T^b}{(T+1)^c}$ | a | $-890.2 \zeta^2 + 89.61 \zeta - 2.405$ | |
| | b | $7576 \zeta^3 - 724.6 \zeta^2 + 24.62 \zeta + 0.1839$ | |
| | c | $-274530 \zeta^4 + 32146 \zeta^3 - 1395 \zeta^2 + 23.27 \zeta + 1.414$ | |

Debido a la escases de registros reales representativos de la amenaza del País, y debido a que la mayoría de estos pertenecían a la región 5, los acelerogramas reales fueron empleados con el fin de comparar los factores por amortiguamiento B_d de ellos derivados, con los obtenidos a partir de los acelerogramas artificiales generados para la misma región. La Figura 3 muestra, para un amortiguamiento del 30%, los factores por amortiguamiento de cada uno de los registros reales empleados y su promedio, muestra además la curva de factores por amortiguamiento presentada en la Tabla 1 para el caso de los acelerogramas artificiales, se evidencia una adecuada coherencia en la tendencia y valores.

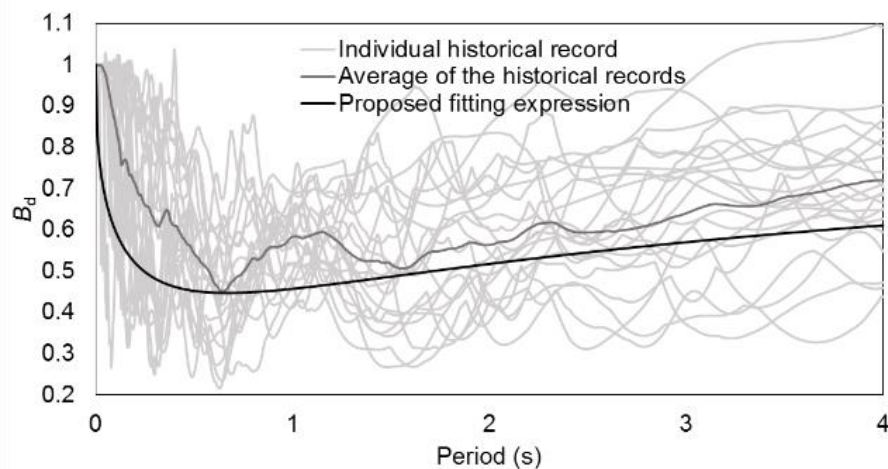


Figura 3. Comparación entre B_d estimado para registros reales y acelerogramas sintéticos

3.1 Ejemplo de verificación

Para evaluar la aplicabilidad de la anterior propuesta, se plantearon 3 sistemas de aislamiento diferentes, ubicados en una edificación tipo hospitalaria localizada en Cali. Se compararon los desplazamientos del sistema de aislamiento obtenidos: a) empleando todos los requisitos del método de la fuerza horizontal equivalente (FHE) definido en ASCE 7, b) aplicando FHE de acuerdo con ASCE, pero empleando el factor por amortiguamiento propuesto en este trabajo, c) realizando análisis dinámicos cronológicos no lineales (ADC), empleando los registros de aceleración utilizados para la generación de los espectros de la microzonificación de Cali (Ingeominas, 2005).

Los sistemas de aislamiento propuestos se describen en la Tabla 2. Se consideraron dos tipos de aisladores elastoméricos, aisladores de goma natural (NRB) y aisladores de núcleo de plomo (LRB).

Tabla 2. Sistemas de aislamiento considerados

| S. Aislamiento No. | LRB | | NRB | | Amortiguamiento (%) | Periodo fundamental (s) |
|--------------------------|-----|----------|-----|----------|------------------------|----------------------------|
| | No. | Diametro | No. | Diametro | | |
| 1 | 20 | 450 | 12 | 450 | 16.69 | 2.15 |
| 2 | 24 | 400 | 8 | 400 | 19.76 | 3.00 |
| 3 | 32 | 500 | - | - | 29.84 | 2.42 |

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3. Se evidencia que la propuesta planteada en este trabajo (tercera columna) permite obtener valores más cercanos a los estimados empleando análisis dinámicos no lineales. Lo anterior indica que la expresión para el cálculo de los factores por amortiguamiento derivada en la presente investigación, es más apropiada para el País que aquella estipulada en ASCE 7.

Tabla 3. Desplazamiento del Sistema de aislamiento (cm)

| S. Aislamiento No. | FHE ASCE 7-10 | FHE usando B_d Tabla 1 | ADC |
|-----------------------|------------------|-----------------------------|-------|
| 1 | 26.41 | 24.20 | 22.32 |
| 2 | 24.81 | 24.27 | 21.93 |
| 3 | 21.93 | 20.22 | 15.52 |

4. Conclusiones

Las comparaciones y validaciones llevadas a cabo con las expresiones desarrolladas en este trabajo, muestran que los acelerogramas artificiales se pueden convertir en una opción viable para la estimación de los factores por amortiguamiento en zonas de escasos registros sísmicos, como es el caso de Colombia.

Existen diferencias importantes entre los factores estimados para el caso de Estados Unidos (ASCE) y los definidos en este trabajo. Se evidencia la dependencia de dichos factores de la amenaza local.

El ejercicio de diseño realizado para edificaciones con aislamiento de base en Colombia, muestra que la aplicación de los factores estimados en esta investigación, presenta mejores resultados que la aplicación de los factores dispuestos en ASCE 7.

Se ha evidenciado una gran influencia del periodo y del amortiguamiento en el factor estimado, siendo menos relevantes parámetros como el tipo de suelo y las regiones sísmicas en las que está dividido el País.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha recibido ayuda del Gobierno español (Ministerio de Ciencia y Tecnología), proyectos BIA2014-60093-R y CGL2015-6591 La estancia de C. Piscal en Barcelona fue financiada por Colciencias, convocatoria 617 y la Universidad de La Salle. Estos apoyos son reconocidos con gratitud.

6. Referencias

ASCE 7-10. (2010). American Society of Civil Engineers Minimum design loads for buildings and other structures. **"ASCE standard 7-10"**.

ASCE 7-16. (2016). American Society of Civil Engineers Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. **"ASCE standard 7-16"**.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). **"Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10"**.

Benavent-Climent, A., López-Almansa, F., & Bravo-González, D. A. (2010). **"Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions based on Colombian earthquakes"**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, *30*(11), 1129–1148.

Bommer, J. J., & Mendis, R. (2005). **"Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios"**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, *34*(2), 145–165.

Cameron, W. I., & Green, R. A. (2007). **"Damping Correction Factors for Horizontal Ground-Motion Response Spectra"**. Bulletin of the Seismological Society of America, *97*(3), 934–960. <https://doi.org/10.1785/0120060034>

Cardone, D., Dolce, M., & Rivelli, M. (2009). **"Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra"**. Bulletin of Earthquake Engineering, *7*(1), 273–291.

EN-1998-2. (2004). **"Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance"**. European committee for standarization.

FEMA. (2004). **"NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450): Provisions/Prepared by the Building Seismic Safety Council"**. Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences.



Hatzigeorgiou, G. D. (2010). **"Damping modification factors for SDOF systems subjected to near-fault, far-fault and artificial earthquakes"**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 39(11), 1239–1258.

Ingeominas. (2005). **"Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Subproyecto de sismotectonia. Informe 1.9 Evaluación de la Amenaza Sísmica Regional en Santiago de Cali"** (No. 1.9). Bogotá: Ingeominas.

Lin, Y.-Y., & Chang, K.-C. (2004). **"Effects of site classes on damping reduction factors"**. Journal of Structural Engineering, 130(11), 1667–1675.

Lin, Y.-Y., Miranda, E., & Chang, K.-C. (2005). **"Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping"**. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34(11), 1427.

Piscal A, C, & Almansa, F. (2018). **"Generating damping modification factors after artificial inputs in scenarios of local records scarcity"**. Bulletin of Earthquake Engineering, 16(11), 5371-5396.

NUREG-0800. (2014). **"Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants. Chapter 3"**. Nuclear Regulatory Commission.

Saez Uribe, A. A. (2014). **"Evaluación del método de análisis modal espectral para edificios con sistemas pasivos de disipación de energía utilizando registros sísmicos chilenos"**.

Saragoni, R., & Hart, G. C. (1973). **"Simulation of artificial earthquakes"**. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2(3), 249–267. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290020305>
SGC. (2014).