

Evaluación de cantidades de concreto necesarias para cumplir requisitos de rigidez en edificaciones aporticadas menores de siete pisos ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia en Colombia

CARLOS MARIO PISCAL ARÉVALO¹
LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ²
NELSON AFANADOR GARCÍA³

RESUMEN

El sistema estructural de pórticos resistentes a momentos en concreto reforzado ha sido de uso común en las edificaciones que se construyen en Colombia, tanto por aspectos funcionales como técnicos. De estos últimos se resalta el amplio conocimiento en cuanto análisis, diseño y construcción se refiere. A pesar de su extenso uso en el país, dicho sistema se caracteriza por una excesiva flexibilidad ante cargas horizontales, por lo cual, en muchas ocasiones, es necesario contar con elementos estructurales de gran tamaño en aras de cumplir los requisitos de rigidez estipulados por las normas de diseño y construcción sismorresistente. Esto muchas veces hace inviable el uso de este sistema estructural desde el punto de vista económico, estructural y arquitectónico. En esta investigación, mediante la realización de 200 modelos computacionales de edificaciones aporticadas típicas con ocupación catalogada como normal (grupo de uso I), parámetros sísmicos correspondientes a zonas de amenaza sísmica intermedia, variación en altura y tipo de suelo, se obtuvieron las cantidades de concreto por metro cuadrado necesarias para cumplir los requisitos de rigidez estipulados en el reglamento colombiano de construcciones sismorresistentes NSR-10. Dichos resultados permitirán al ingeniero diseñador

¹ Ingeniero civil. MSc. Profesor asistente. Investigador, Programa de Ingeniería Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: cpiscal@unisalle.edu.co

² Ingeniero civil. MSc. Profesor asistente. Investigador, Programa de Ingeniería Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: luglopez@unisalle.edu.co

³ Ingeniero civil. MSc. Profesor Investigador, Programa de Ingeniería Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, Colombia. Correo electrónico: nafanador@ufps.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 14 DE ENERO DE 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 11 DE MAYO DE 2014

Cómo citar este artículo: Piscal Arévalo, C. M., López Yépez, L. G. y Afanador García, N. (2014). Evaluación de cantidades de concreto necesarias para cumplir requisitos de rigidez en edificaciones aporticadas menores de siete pisos ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia en Colombia. *Épsilon* (23), 127-137.

contar con una herramienta aproximada para evaluar la viabilidad económica y funcional del uso de sistemas aporticados en posibles proyectos para desarrollar, siempre y cuando estos se encuentren dentro del número de niveles evaluado en esta investigación. Por otra parte, si el uso del sistema se considera viable, se obtiene rápidamente un predimensionamiento de la estructura, teniendo en cuenta efectos horizontales, generalmente predominantes en este tipo de edificaciones, para la selección de las secciones para utilizar.

Palabras clave: pórticos, zona de amenaza sísmica intermedia, rigidez, derivas, NSR-10.

Evaluation of the amounts of concrete needed to meet stiffness requirements in portal frame buildings with less than seven storeys located in areas of intermediate seismic hazard in Colombia

ABSTRACT

The structural system of reinforced concrete moment-resistant portal frames has been commonly used in buildings constructed in Colombia, due to both functional and technical aspects. Of the latter, extensive knowledge regarding analysis, design and construction is highlighted. Despite its widespread use in the country, this system is characterized by excessive flexibility to horizontal loads, so, in many cases, it is necessary to have large structural elements in order to meet the stiffness requirements stipulated by regulations on earthquake resistant design and construction. This often makes it unfeasible to use this structural system from economic, structural, and architectural points of view. This research, by designing 200 computer models of typical portal frame buildings with occupation listed as standard (group of use I), seismic parameters corresponding to intermediate seismic hazard zones, and variation in height and soil type, demonstrated the quantities of concrete needed per square meter to meet the stiffness requirements stipulated in the Colombian regulations on earthquake resistant constructions (NSR-10). These results allow the design engineer to count on a tool to assess the economic and operational feasibility of using portal frame systems in possible projects to develop, as long as they are within the number of storeys evaluated in this research. Moreover, if the use of the system is considered feasible, a pre-sizing of the structure can be rapidly obtained, considering horizontal effects generally predominant in this type of constructions, to select sections to be used.

Keywords: portal frame, intermediate seismic hazard zone, stiffness, drifts, NSR-10.

Avaliação de quantidades de concreto necessárias para cumprir requisitos de rigidez em edificações com pórticos inferiores de sete pisos localizadas em zonas de ameaça sísmica intermediária na Colômbia

RESUMO

O sistema estrutural de pórticos resistentes a movimentos em concreto reforçado tornou-se de uso comum nas edificações que se constroem na Colômbia, tanto por aspectos funcionais como técnicos. Destes últimos se destaca o amplo conhecimento no que se refere à análise, desenho e construção. A pesar de seu extenso uso no país, este sistema se caracteriza por uma excessiva flexibilidade perante cargas horizontais, razão pela qual, em muitas ocasiões, se torna necessário contar com elementos estruturais de grande tamanho com a finalidade de cumprir os requisitos de rigidez estipulados pelas normas de desenho e construção sismo-resistente. O anteriormente exposto muitas vezes faz com que seja inviável o uso deste sistema estrutural desde o ponto de vista econômico, estrutural e arquitetônico. Nesta pesquisa, mediante a realização de 200 modelos computacionais de edificações com pórticos típicas com ocupação catalogada como normal (grupo de uso I), parâmetros sísmicos correspondentes a zonas de ameaça sísmica intermedia, variação em altura e tipo de solo, se obtiveram as quantidades de concreto por metro quadrado necessárias para cumprir os requisitos de rigidez estipulados no regulamento colombiano de construções sismo resistentes NSR-10. Estes resultados permitirão ao engenheiro designer contar com uma ferramenta aproximada para avaliar a viabilidade econômica e funcional do uso de sistemas de pórticos em possíveis projetos a ser desenvolvidos, sempre e quando estes se encontrem dentro do número de níveis avaliado nesta pesquisa. Por outra parte, se o uso do sistema se considera viável, se obtém rapidamente um pré-dimensionamento da estrutura, levando em conta os efeitos horizontais, efeitos geralmente predominantes neste tipo de edificações, para a seleção das seções a utilizar.

Palavras chave: pórticos, zona de ameaça sísmica intermediária, rigidez, derivas, NSR-10.

Introducción

El sistema de pórticos resistentes a momento, de acuerdo con la definición del reglamento NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2010), es un “sistema estructural compuesto por un pórtico espacial, resistente a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, que resiste todas las cargas verticales y horizontales” (A-41). La construcción de estos sistemas ha predominado en el país aproximadamente desde 1983 debido a una serie de ventajas evidenciadas (Bonnet, 2003), entre ellas: la fácil distribución y reacomodación de espacios; los procesos constructivos rápidos y eficientes, y el conocimiento claro de su análisis y diseño estructural. Sin embargo, también se ha evidenciado en diferentes eventos sísmicos ocurridos dentro y fuera del país que este sistema presenta daños considerables en los elementos no estructurales, debido a su gran flexibilidad (Bungale, 2010).

Para evitar los inconvenientes anteriormente mencionados, la flexibilidad de los sistemas aporticados está controlada en el reglamento NSR-10 por los límites de deriva establecidos (1 % altura de entrepiso) (García, 1999). Para cumplir dicho criterio, se hace necesario contar con secciones de elementos estructurales de gran tamaño, en muchas ocasiones inviables desde el punto de vista económico, estructural y arquitectónico. Otra posible solución para reducir su flexibilidad es la adoptada en el ámbito internacional, en la cual se rigidizan lateralmente dichos sistemas mediante el empleo de muros estructurales (Bangash, 2011), lo que origina nuevos sistemas estructurales denominados en el reglamento de construcciones sismorresistentes de Colombia como sistema combinado o dual.

Este artículo pretende evaluar la viabilidad económica y funcional del uso de sistemas estructurales netamente aporticados, ubicados específicamente en zonas de amenaza sísmica intermedia y empleados para edificaciones catalogadas como de ocupación normal. Dicha evaluación se llevó a cabo definiendo el volumen de concreto por cada metro cuadrado de área en planta tanto en vigas como en columnas, necesario para cumplir con los requisitos de deriva establecidos por el reglamento colombiano de construcciones sismorresistentes NSR-10. Para tal fin, se analizó mediante un software especializado (SAP2000) una estructura típica, con variación en la altura, tipo de suelo y parámetros sísmicos.

Metodología

La planta típica seleccionada se muestra en la figura 1. Dicha planta sin ningún tipo de irregularidad se adaptó de García (1996), conservando, además de las distancias entre ejes, la disposición y número de vigas y columnas (Ruiz, Borrero, León y Vacca, 2013). Para este análisis, siguiendo características comunes de este tipo de edificaciones, se empleó una altura de entrepiso de 3 m y se consideró tanto para el entrepiso como para la cubierta una losa aligerada trabajando en la dirección más corta.

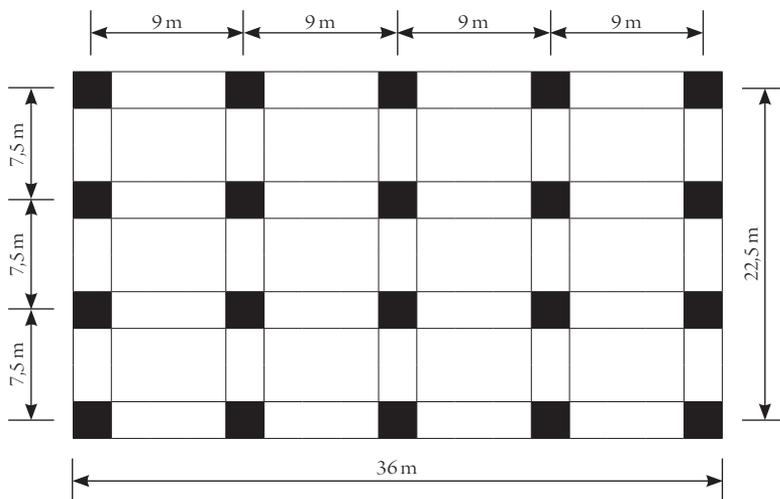


Figura 1. Planta típica

Fuente: adaptada de García L (1996).

Las cargas muertas empleadas fueron de 7 kN/m^2 para los entrepisos, y de 4 kN/m^2 para las cubiertas. Las cargas vivas se tomaron como $1,8 \text{ kN/m}^2$. Todo lo anterior es típico de una edificación catalogada de acuerdo con el NSR-10 como de ocupación normal, el tipo de edificaciones estudiadas en este artículo. Para la determinación de las cargas horizontales se empleó el método de análisis modal espectral, metodología que permite obtener las fuerzas sísmicas mediante un análisis dinámico lineal elástico de las edificaciones (Maldonado y Chio Cho, 2004). Dicha metodología está permitida en el reglamento colombiano sin ninguna restricción para edificaciones regulares catalogadas dentro del grupo de uso I (Rochel, 2012).

Se consideró para cada nivel de entrecimiento un diafragma rígido teniendo en cuenta el tipo de losa empleado en estas edificaciones (maciza o aligerada), su material (concreto) y lo regular de la geometría. Para la determinación de la aceleración espectral, se utilizaron valores de aceleración y velocidad pico efectiva (A_a , A_v) concernientes a zonas de amenaza sísmica intermedia en el país, valores comprendidos entre 0,10 y 0,20 g, considerando además sus posibles combinaciones. En la tabla 1 se muestran los valores empleados.

Tabla 1. Valores de aceleración y velocidad pico efectiva empleados

A_a	A_v
0,20	0,20
0,20	0,15
0,15	0,20
0,15	0,15
0,05	0,15
0,10	0,15
0,15	0,10
0,010	0,20

Fuente: elaboración propia.

Cada par de parámetros fue evaluado junto a los cinco posibles tipos de perfil de suelo considerados en NSR-10, para obtener así sus respectivos coeficientes de amplificación tanto para la zona de periodos cortos F_a (tabla 2), como para la de periodos intermedios F_v (tabla 3). El tipo de perfil denominado F no fue considerado debido a que requiere una investigación geotécnica particular. El coeficiente de importancia se especificó como 1,0 teniendo en cuenta el grupo de uso considerado para las edificaciones de este proyecto.

Tabla 2. Valores del coeficiente para la zona de periodos cortos del espectro

TIPO DE PERFIL	INTENSIDAD DE LOS MOVIMIENTO SÍSMICOS				
	$A_a \leq 0,1$	$A_a = 0,2$	$A_a = 0,3$	$A_a = 0,4$	$A_a \geq 0,25$
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

TIPO DE PERFIL	INTENSIDAD DE LOS MOVIMIENTO SÍSMICOS				
	$A_a \leq 0,1$	$A_a = 0,2$	$A_a = 0,3$	$A_a = 0,4$	$A_a \geq 0,25$
C	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
D	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
E	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010).

Tabla 3. Valores del coeficiente para la zonas intermedios del espectro

TIPO DE PERFIL	INTENSIDAD DE LOS MOVIMIENTO SÍSMICOS				
	$A_u \leq 0,1$	$A_u = 0,2$	$A_u = 0,3$	$A_u = 0,4$	$A_u \geq 0,25$
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
D	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
E	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4

Fuente: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010).

La combinación de los parámetros sísmicos y los coeficientes de amplificación permitió la generación de 40 espectros elásticos de diseño, los cuales fueron calculados usando el software Espec10 V1.0 (Piscal, Lamus y Araque, 2013). Para el estudio aquí presentado se consideraron edificaciones tipo (figura 1), con variación en altura entre dos y seis niveles. No se tuvieron en cuenta aquellas de un solo nivel, ya que se considera que este tipo de estructuras sin mayores inconvenientes podrían ser diseñadas mediante sistemas aporticados. Las anteriores estructuras se escogieron teniendo en cuenta que actualmente el sistema estructural en estudio predomina en este tipo de edificaciones.

Para cada nivel analizado se realizó un análisis modal espectral y se llevaron a cabo los respectivos ajustes de cortante siguiendo los lineamientos de NSR-10. Teniendo en cuenta los cinco niveles establecidos con anterioridad, se obtuvieron finalmente 200 modelos computacionales.

El análisis de cada una de las edificaciones se realizó mediante el software SAP2000. El cortante estático se determinó mediante la opción de *user coefficients*. Para cada es-

estructura se determinaron las secciones de vigas y columnas necesarias para cumplir los requisitos de rigidez establecidos en NSR-10. Dichas secciones se transformaron en volúmenes de concreto, por cada metro cuadrado de área construida. Cabe resaltar que para establecer las secciones de vigas y columnas se tuvo en cuenta el criterio de columna fuerte y viga débil, por lo cual siempre las dimensiones de columnas se establecieron mayores a las de las vigas, aproximadamente las primeras siempre 1,5 veces mayores que las segundas.

Teniendo en cuenta que las dimensiones definitivas de los elementos estructurales deben cumplir además de requisitos de rigidez, requisitos de resistencia, se propone en este trabajo complementar los resultados aquí obtenidos con los requisitos mínimos estipulados en el reglamento NSR-10 en función del grado de disipación de energía que se le asigne a la estructura, además del empleo de procedimientos de predimensionamiento que tengan en cuenta los efectos verticales.

Resultados y discusión

La figura 2 resume los resultados obtenidos para cada uno de los 200 modelos analizados. En el eje de las abscisas se ubicó la aceleración espectral mientras en los ejes verticales derecho e izquierdo se ubicaron los volúmenes de concreto por metro cuadrado requeridos para vigas y columnas respectivamente. Se obtuvieron diferentes gráficas en función del número de niveles de la edificación.

Para el uso de la anterior información se requiere del conocimiento de parámetros básicos de la estructura, parámetros tales como: número de niveles, aceleración espectral obtenida para un periodo representativo, luces de las vigas, altura de las columnas. A partir de la aceleración espectral y el número de niveles se determina el volumen de concreto por metro cuadrado requerido para cumplir requisitos de rigidez. Este valor se multiplica por la mayor área en planta de la edificación, con lo cual se obtiene un volumen de concreto. Luego se divide dicho volumen entre la sumatoria de las alturas de las columnas, o la sumatoria de las luces de las vigas, dependiendo del caso. El resultado es el área de la sección transversal que se requiere, la cual fácilmente puede ser convertida a dimensiones específicas. Lo anterior se expresa en las ecuaciones (1) y (2).

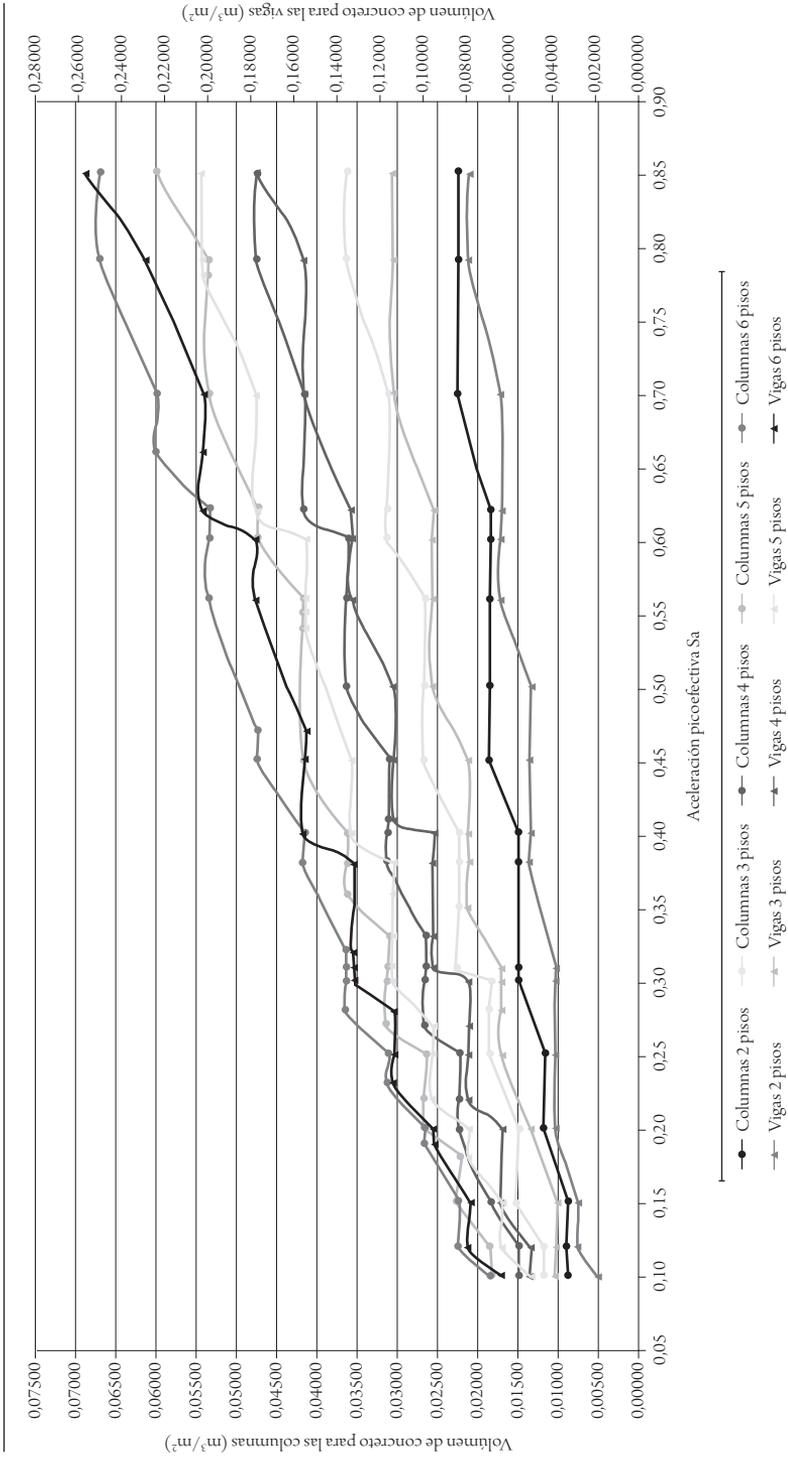


Figura 2. Volumen de concreto por metro cuadrado para cada elemento estructural

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Área sección transversal columnas} = \frac{V * A}{\Sigma \text{ altura columnas para nivel } i} \quad (1)$$

$$\text{Área sección transversal vigas} = \frac{V * A}{\Sigma \text{ longitudes de vigas para nivel } i} \quad (2)$$

Donde:

V = Volumen de concreto por m^2

A = Mayor área en planta de la edificación

Nivel i = Nivel de mayor área en planta de la edificación

Cabe recordar que los valores anteriormente obtenidos son aproximados y deben ser chequeados mediante análisis completos desarrollados a través de modelos computacionales.

Conclusiones

Los resultados anteriores son de utilidad para los ingenieros diseñadores, ya que permiten conocer aproximadamente las secciones requeridas tanto de vigas como de columnas necesarias para cumplir requisitos de rigidez en proyectos futuros que se van a desarrollar, siempre y cuando estos se encuentren dentro de los parámetros analizados en esta investigación.

Establecer secciones aproximadas para los proyectos que se van a desarrollar permite además determinar desde el punto de vista económico y funcional si el sistema estructural en consideración, en este caso aporticado, es el adecuado.

Los datos obtenidos de la presente investigación ayudan a suplir las falencias que presentan las metodologías actuales de predimensionamiento para sistemas aporticados. Se debería ampliar esta investigación incrementando el número de niveles y considerando parámetros sísmicos de zonas de amenaza sísmica alta y baja. Por último, también se debería tener en cuenta el efecto de las cargas verticales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a David Alfonso, Óscar Cuervo, Nathaly Carrión y Angie Lamprea, por la colaboración prestada para el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismorresistente. NSR-10*. Bogotá.
- Bangash, M. (2011). *Earthquake Resistant Buildings*. Londres: Springer.
- Bonnet, R. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zona de amenaza alta y moderada* (tesis doctoral). Barcelona.
- Bungale, S. (2010). *Reinforced concrete design of tall buildings*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- García, L. (1996). Economic considerations of displacement-based seismic design of structural concrete buildings. *Structural Engineering International*, 6(4), 243-248.
- García, L. (1999). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Maldonado, R. y Chio Cho, G. (2004). *Análisis sísmico de edificaciones*. Bucaramanga: Editorial Universidad Industrial de Santander.
- Piscal, C., Lamus, F. y Araque, L. (2013). Herramienta computacional para el cálculo de fuerzas sísmicas usando el método de la fuerza horizontal equivalente. *Épsilon*, (20), 215-235.
- Rochel, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificaciones*. Medellín: Editorial Universidad Eafit.
- Ruiz, D., Borrero, M., León, M. y Vacca, H. (2013). Estimación de la incertidumbre aleatoria de la distorsión sísmica de entrepiso de pórticos de concreto reforzado considerando la variabilidad del módulo elástico del concreto de Bogotá. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1), 95-106.

