

Características estructurales de escuelas colombianas de pórticos de hormigón reforzado con mampostería no reforzada

Ana B. Acevedo ¹ y Faver N. Zora Mejía ²

Recepción: 22-11-2016 | Aceptación: 24-04-2017 | En línea: 08-05-2017

doi:10.17230/ingciencia.13.25.9

Resumen

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica del inventario de edificaciones de una región es de vital importancia para poder estimar el riesgo sísmico del lugar. Las escuelas constituyen una importante clase estructural por el alto número de personas que albergan, su rol social y la posibilidad de ser usadas como centros de atención en eventuales emergencias. En este artículo se presenta el análisis de las características de 77 edificios pertenecientes a 28 escuelas de los municipios de Medellín, Itagüí y Sabaneta (Colombia). Cada edificio es una estructura de pórticos de hormigón reforzado con muros de mampostería no reforzada. Dentro de los parámetros analizados se encuentra el número de pisos, altura de la edificación, área en planta, irregularidades en planta y en altura, presencia de columnas cortas, materiales de muros, dimensiones de columnas y muros, tipo de suelo, carga lateral de diseño, nivel de mantenimiento, año de construcción y existencia de daños o intervenciones de repotenciación. El análisis presentado constituye información valiosa que puede usarse para fines de

¹ Universidad EAFIT, aaceved14@eafit.edu.co,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3869-4373>, Medellín, Colombia.

² Universidad EAFIT, fzoramej@eafit.edu.co,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4635-5555>, Medellín, Colombia.

estimación de la vulnerabilidad de este grupo estructural y, por lo tanto, de su riesgo sísmico.

Palabras clave: Vulnerabilidad; escuelas; riesgo sísmico; características estructurales y hormigón reforzado.

Structural Characteristics of Colombian School of Reinforced Concrete Moment Frames With Masonry Infill

Abstract

Assessment of the seismic vulnerability of the building stock of a region is a key issue for its seismic risk evaluation. Schools are an important building class as they gather a high number of people, they are important for the social development and they could be used as shelters after an emergency. This paper presents an assessment of the characteristics of 77 buildings from 28 schools of Medellín, Itagüí and Sabaneta (Colombia). Each building is a reinforced concrete frame with masonry infill. Analyzed parameters include the number of stories, building height, ground floor area, height and plan irregularity, presence of short columns, walls materials, columns and walls dimensions, soil type, designed lateral load, level of maintenance, year of construction and presence of damage or retrofit intervention. The analysis of the schools characteristics represents useful information that could be used for the estimation of the vulnerability of this building class, as well as for its seismic risk assessment.

Key words: Vulnerability; schools; seismic risk; structural characteristics and reinforced concrete.

1 Introducción

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones escolares en la última década ha sido un tema de interés debido a que varios sismos alrededor del mundo han demostrado la alta vulnerabilidad de este tipo de estructuras. Un alto número de menores ha perdido su vida debido al colapso de escuelas, como ocurrió en los sismos de Wenchuan, China (2008), Armenia (1988) y Cachemira, Pakistan (2005), en donde 7,000, 16,000 y 18,000 menores perdieron la vida, respectivamente [1]. El sismo de Cariaco de 1997 ($M_w = 6.9$) de Venezuela que causó la muerte de 22 estudiantes y un profesor, generó el colapso de cuatro escuelas, todas ellas de pórticos de

hormigón reforzado con muros de mampostería no reforzada, con alturas de dos y tres pisos y construidas entre 1960 y 1970 [2].

Un gran porcentaje de escuelas del inventario mundial lo constituyen pórticos de hormigón reforzado. Del total de 48,503 escuelas italianas 19,637 tienen esta tipología [3]. Verbicaro *et al.* [4] mencionan como edificio escolar típico en América Central estructuras de pórticos de hormigón de uno a dos pisos. Por su parte, una escuela típica en Algeria corresponde a una estructura de pórticos de concreto con losa de concreto y muros de mampostería hueca [5]. López *et al.* [6] identificaron 10,000 escuelas venezolanas (30% de la totalidad de escuelas) como similares o idénticas a las escuelas colapsadas en el sismo de Cariaco de 1997. Ferreira y Poença [7] identificaron 48% de las 470 escuelas en Bucarest como estructuras de uno o dos pisos en donde el material de construcción predominante es el concreto reforzado. Un estimado de las tipologías estructurales de la Región Andina en Sur y Centro América [8] indica que más de la mitad de las escuelas en México y Chile son edificios de hormigón reforzado (60 y 55%, respectivamente). Otros países reportados con un número considerable de escuelas de hormigón reforzado son Colombia y Honduras (30%), y Perú y Argentina (20%).

La importancia de la evaluación y mitigación del riesgo sísmico ha tomado fuerza en los últimos años, siendo la evaluación de la vulnerabilidad clave para el análisis del riesgo. Idealmente todos los edificios del inventario deberían ser evaluados. Como lo anterior es una tarea imposible de realizar, los esfuerzos se deben concentrar inicialmente en aquellas estructuras de mayor importancia para la sociedad. Las escuelas son estructuras críticas al concentrar un alto número de menores cuyas vidas son invaluable. Adicionalmente, este tipo de estructuras podrían usarse como refugios y centros de atención en el momento de un desastre.

Una evaluación completa de la vulnerabilidad de cada una de las escuelas de una región implicaría una inversión muy elevada de tiempo y de recursos. Por lo anterior se han desarrollado varias metodologías para identificar, dentro de un grupo de estructuras, aquellas con el mayor riesgo y que, por lo tanto, requieren de un estudio de vulnerabilidad detallado. Independiente de la metodología a utilizar es necesario diferenciar la tipología estructural (pórtico de hormigón reforzado, mampostería, tierra, etc.) para poder evaluar de manera correcta la capacidad estructural. Varias metodo-

logías pueden aplicarse a estructuras de concreto tales como DBELA [9], Índice Prioritario [10], Grado Mínimo de Daño (Mean Damage Grade) según la metodología basada en la escala macrosísmica europea [11], entre otras. Gran parte de los parámetros que requiere cada una de las mencionadas metodologías se presentan y analizan en este informe.

2 Información recolectada

La información presentada en este documento fue recolectada por un grupo de tres personas (un estudiante de maestría y dos estudiantes de pregrado en ingeniería civil) que visitaron cada una de las escuelas en un periodo aproximado de dos horas. Se desarrolló un formato en donde se recolectó la información general (localización, año de construcción, grado de mantenimiento y características geométricas). Durante la visita se levantó un plano de la estructura, se recopiló información y se tomaron fotografías. La información recopilada fue procesada por los autores de este documento y se divide en las siguientes clases: información general, configuración estructural, características de los materiales, parámetros de capacidad, características geométricas e información adicional.

2.1 Información general

De cada estructura se recopiló información sobre la municipalidad donde se encuentra, dirección, coordenadas geográficas, año de construcción y fecha de la visita.

2.2 Configuración estructural

Esta clase incluye los siguientes parámetros: altura del edificio, número de pisos, altura promedio de entre-piso, longitud del edificio en la dirección principal (X) y en la dirección secundaria o transversal (Y), longitud de voladizos en ambas direcciones, número de ejes y espaciamiento promedio entre ejes en ambas direcciones, configuración en planta y en altura, tipo de irregularidad en planta (irregularidad torsional, de diafragma, sistemas no

paralelos y desplazamiento del plano de acción) y en altura (piso flexible, irregularidad geométrica, distribución de masas y desplazamiento dentro del plano de acción), tipo de losa (aligerada o maciza) y tipo de techo (concreto, acero o madera).

2.3 Características de los materiales

Las características de los materiales incluyen el tipo de mampostería adosada (ladrillo hueco de concreto, ladrillo hueco de mampostería o ladrillo sólido de mampostería) y apreciación sobre la conservación del techo y la calidad de los materiales y la construcción.

2.4 Parámetros de capacidad

En esta clase se agruparon aquellas características que afectan directamente la capacidad de la estructura. Se incluyó la presencia o ausencia de columnas cortas, el peso del edificio, la carga lateral de diseño y la aceleración espectral de diseño, el tipo de suelo y la existencia de intervenciones de repotenciación.

Para la definición de la carga lateral y la aceleración espectral de diseño se consideraron las especificaciones del código de diseño sísmico vigente en el año de construcción de la estructura. Para aquellas escuelas construidas antes del año 1984 (año en que se publicó la primera norma de construcción sismo resistente del país) se consideró un valor de cero en ambos parámetros.

El tipo de suelo se definió según el estudio de microzonificación sísmica de Medellín y su área metropolitana [12]. El tipo de suelo incluye depósitos aluviales, flujos de escombros, terrazas aluviales, llanura aluvial, terraza aluvial, depósitos de ladera, depósitos aluviales y depósitos aluviales torrenciales.

2.5 Características geométricas

Las características geométricas incluyen área promedio de piso, área del piso inferior, dimensiones de las columnas, sumatoria de áreas de columnas

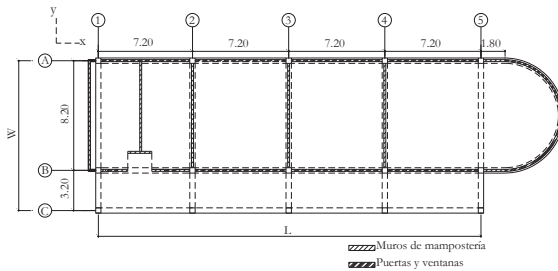
del primer piso, longitud de muros, sumatoria de áreas de muros en las dos direcciones principales y espesor de muros.

2.6 Información adicional

Para cada estructura se calculó la relación entre la aceleración espectral para la cual fue diseñada y la aceleración espectral de diseño de acuerdo a la norma sismo resistente vigente NSR-10 [13]. Adicionalmente se especificó el nivel de instrucción de la institución (pre-escolar y elemental, elemental, secundaria, elemental y secundaria). Para cada estructura se cuenta con un archivo de fotos, el plano de la planta y notas que describen el nivel de mantenimiento de cada estructura.

La Figura 1 presenta la planta de una de las escuelas y los valores de los principales parámetros relacionados con la configuración estructural y las características geométricas.

La mayoría de los edificios encuestados son de uno o dos pisos. La configuración típica en planta es de forma rectangular, con una relación menor o igual que dos entre la longitud principal y la longitud transversal, con dos o tres ejes en la longitud mayor. Los pórticos longitudinales están unidos por pórticos perpendiculares con o sin voladizo (el voladizo se usa normalmente como corredor). El piso está conformado por losas de concreto (84% aligeradas, 16% macizas) y los muros son hechos principalmente de mampostería hueca de arcilla (73% de los edificios). La mayoría de los edificios visitados presentan columnas cortas debido a las ventanas localizadas en la parte superior de los muros con fines de ventilación e iluminación (65% de las estructuras tienen columnas cortas). Se encontró el techo de madera como el más común (64% de las estructuras), seguido de techo metálico y de concreto (21 y 16%, respectivamente). La Figura 2 presenta la configuración típica estructural con dos pórticos longitudinales (52% de las estructuras evaluadas). La Figura 3 muestra un ejemplo de una estructura con irregularidad en planta y la Figura 4 presenta un ejemplo de una escuela con irregularidad en planta y en altura.

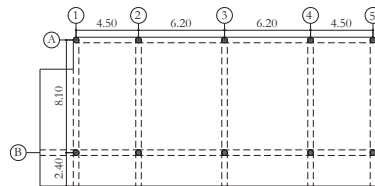


Características geométricas:
 Área promedio de piso: 384.42 m²
 Área del piso inferior: 384.42 m²
 Dimensiones de columnas: 0.40 x 0.40 m
 Área total de columnas: 2.56 m²
 Longitud total de muros de mampostería en la dirección X: 8.95 m
 Longitud total de muros de concreto en la dirección X: 0.0 m
 Longitud total de muros de mampostería en la dirección Y: 43.25 m
 Longitud total de muros de concreto en la dirección Y: 0.0 m
 Espesor promedio de muros de mampostería: 0.15 m
 Espesor promedio de muros de concreto: 0.0 m

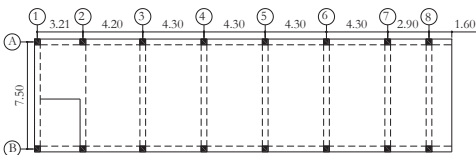
Configuración estructural:

Altura del edificio: 5.40 m
 Número de pisos: 2
 Altura promedio de entre-piso: 2.70 m
 Longitud en la dirección X (L): 28.8 m
 Longitud de voladizo en la dirección X: 0.0 m
 Longitud en la dirección Y (W): 11.4 m
 Longitud de voladizo en la dirección X: 0.0 m
 Relación longitud-ancho: 2.50
 Número de ejes en la dirección X: 5
 Número de ejes en la dirección Y: 3
 Espaciamiento promedio en la dirección X: 7.20 m
 Espaciamiento promedio en la dirección Y: 5.70 m
 Configuración en planta: Regular
 Tipo de irregularidad en planta: N/A
 Configuración en altura: Regular
 Tipo de irregularidad en altura: N/A
 Tipo de losa: aligerada
 Tipo de techo: cubierta de madera

Figura 1: Configuración estructural y características geométricas de un edificio en particular.

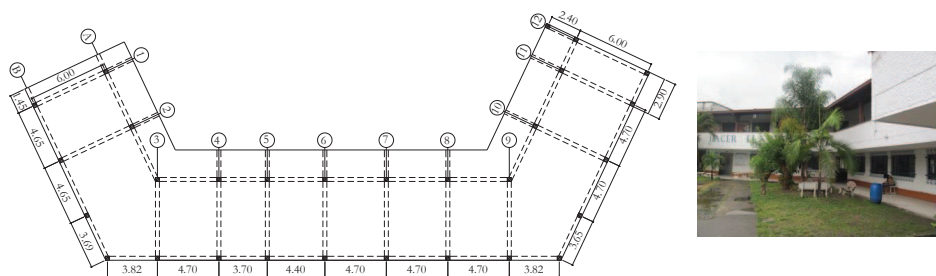


a) Ejemplo 1

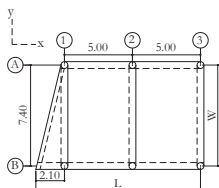


b) Ejemplo 2

Figura 2: Configuración estructural típica (distancias en metros).



a) Edificio con irregularidad de diafragma



b) Edificio con sistema no paralelo

Figura 3: Ejemplo de irregularidad en planta (distancias en metros).

La configuración típica arquitectónica de las escuelas visitadas es muy similar a la configuración descrita para escuelas de Algeria [5] y de Centro América [4]. Adicionalmente, las características principales de las escuelas que colapsaron en el sismo de Cariaco (1997) en Venezuela se asemejan a las características principales de las escuelas dentro de la base de datos presentada. Bendimerad [5] indica cuatro errores comunes en la configuración de las escuelas de Algeria que también se observan en las escuelas colombianas y latinoamericanas: i) algunas conexiones viga-columna no se diseñan o construyen para transmitir de manera adecuada cargas laterales y el detallado inadecuado de los elementos de pórtico inhibe un comportamiento dúctil; ii) diferencias en la localización del centro de masa y el centro de rigidez debido a la presencia de los corredores generan efectos torsionales que normalmente no se consideran en el diseño; iii) en el diseño se desconocen los altos niveles de esfuerzos cortantes que se generan en las columnas cortas debido a la interacción del pórtico y los muros; iv) la configuración irregular en planta genera concentración de esfuerzos que

pueden causar colapso estructural si no se consideran en el diseño. Adicional a los problemas mencionados, la mala calidad de los materiales, mano de obra inadecuada, movimientos fuertes del terreno inesperados y la falta de cumplimiento de normas sísmicas afectan de manera negativa la capacidad sísmica de las estructuras.

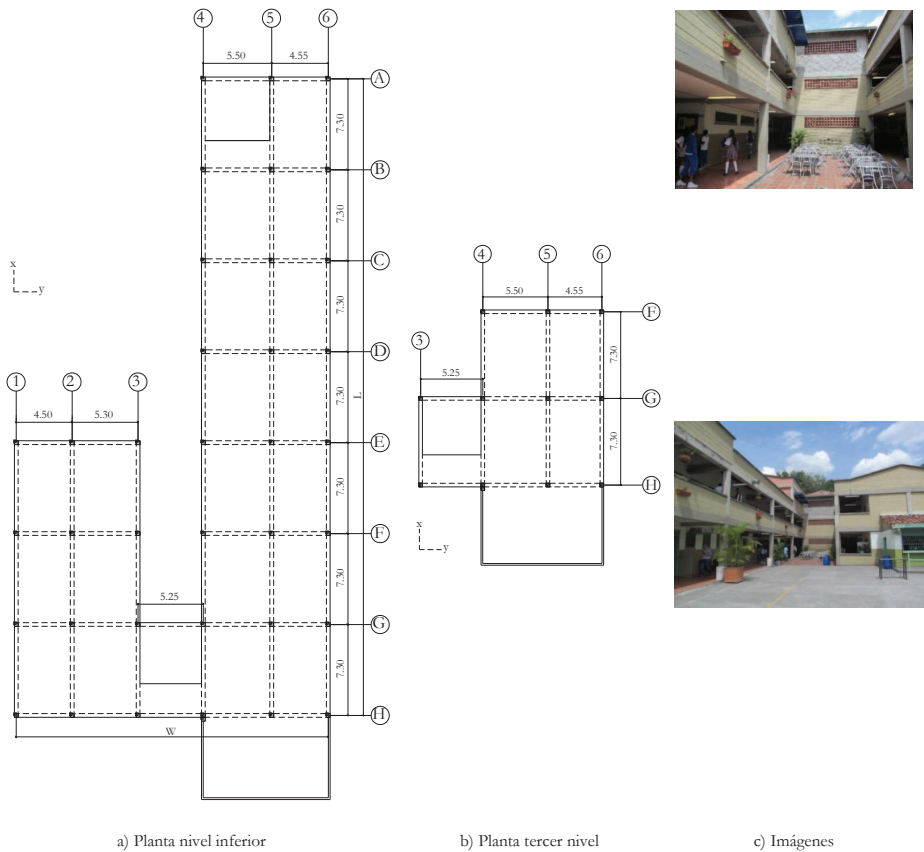


Figura 4: Ejemplo de irregularidad en planta (diafragma) y en altura (geométrica).

La primera norma sismo-resistente colombiana data del año 1984 (Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente, CCCSR-84 [14]). Es muy probable que las estructuras construidas antes de dicho año no hayan

incluido consideraciones sísmicas. Este código ha sido actualizado en dos ocasiones: inicialmente en el año 1998 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-98 [15]), y posteriormente en el año 2010 (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10 [13]). Las consideraciones sísmicas de los códigos de 1998 y 2010 tienen diferencias considerables con respecto a las consideraciones del primer código. Por lo anterior, se espera que estructuras construidas después del año de 1998 tengan un mejor comportamiento que aquellas construidas entre 1984 y 1998. Desafortunadamente, para muchas escuelas construidas después de 1984 la existencia de códigos de diseño no implica necesariamente el cumplimiento cabal de sus regulaciones.

3 Procesamiento de la información

En esta sección se presenta el análisis general de la información. La Figura 5 presenta el año de construcción de las edificaciones agrupadas por décadas. La escuela más antigua de la base de datos se construyó en el año de 1961, mientras que la más reciente se construyó en el año 2013. Las tres fechas de importancia de la base de datos son: año 1984, en el cual se aprobó el primer código sismo resistente del país (CCCCSR-84); el año de 1998, cuando se actualizó por primera vez el primer código (NSR-98); y el año 2010, correspondiente a la más reciente actualización del código (NSR-10).

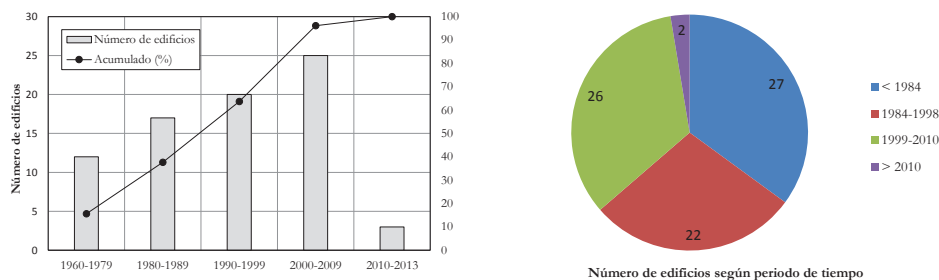


Figura 5: Distribución del año de construcción.

El año de construcción es un indicador del tipo de diseño en el momento de construcción de las estructuras. Se puede asumir que todas las escuelas construidas antes del año de 1984 no incluyeron diseño sísmico. Se debe tener en cuenta que el hecho de que exista un código vigente no implica un cumplimiento total de sus especificaciones.

Los edificios en la base de datos tienen entre uno y cuatro pisos. La Figura 6 muestra la distribución del número de pisos. Se puede observar que la mayoría de las escuelas (el 51% del total) son estructuras de dos pisos.

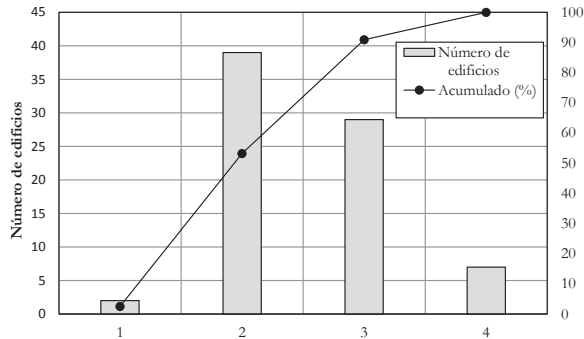


Figura 6: Distribución del número de pisos.

Las Figuras 7 a 12 muestran el histograma de frecuencia de diferentes parámetros de las estructuras de la base de datos: altura promedio de piso, relación largo-ancho, área del primer piso, relación de la suma de las columnas del primer piso con respecto al área de piso y relación de la suma de las áreas de muros de mampostería con respecto el área de piso en las direcciones principal y secundaria. Todos los parámetros mencionados presentan una distribución normal o log-normal. La Tabla 1 presenta el tipo de distribución y los valores de la media y la desviación estándar de los parámetros analizados.

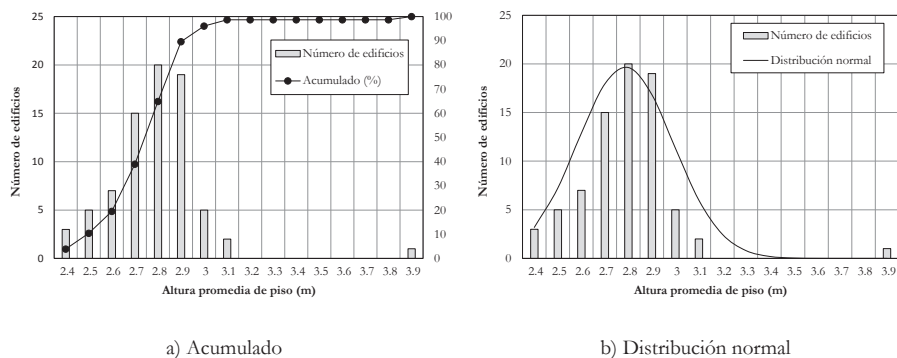


Figura 7: Distribución de la altura promedio de piso.

Tabla 1: Parámetros estadísticos de la información recopilada

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Tipo de distribución	Media	Desviación estándar	Moda	Número de edificios incluidos
Altura promedio de piso (m)	2.4	3.9	Normal	2.79	0.20	2.80	77
Relación largo-ancho	0.8	7.3	Log-normal	2.55	1.36	1.76	69 ⁽¹⁾
Área de piso inferior (m ²)	22	1648	Log-normal	280	228	130	77
Relación de la suma del área de las columnas del primero piso con relación al área de piso	0.0017	0.0231	Log-normal	0.009	0.0042	0.007	77
Relación de la suma del área de muros del primero piso con respecto al área de piso (dirección principal)	0.0000	0.0673	Log-normal	0.016	0.012	0.008	74 ⁽²⁾
Relación de la suma del área de muros del primero piso con respecto al área de piso (dirección secundaria)	0.0001	0.0439	Log-normal	0.019	0.008	0.014	74 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Se excluyeron ocho edificios ya que no fue posible identificar claramente la relación longitud-ancho

⁽²⁾ Se excluyeron tres edificios debido a su irregularidad

El 26% de las escuelas visitadas tienen una altura promedio de piso de 2.8 m, valor que corresponde a la media de la distribución (Figura 7). La irregularidad en planta se puede definir por la relación largo-ancho: 42% de

las estructuras (32 edificios) se clasificaron como regulares en planta (relación largo-ancho entre 1.0 y 2.8); 24% de los edificios presentan efectos torsionales, mientras el restante 34% presentan otro tipo de irregularidad (Figura 8). El valor máximo de la distribución log-normal corresponde a una relación longitud-ancho entre 1.5 y 1.99 (17% de las estructuras encuestadas).

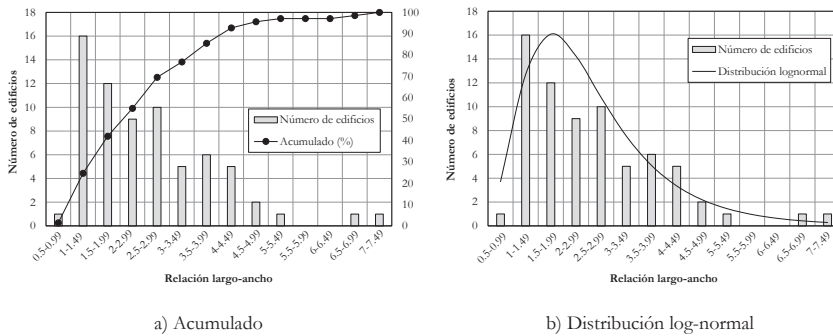


Figura 8: Distribución de la relación largo-ancho.

La Figura 9 presenta la distribución del área del primer piso de las estructuras de la base de datos, parámetro que presentó un promedio de 280 m². Para la mayoría de los edificios (62% del total), la suma de las áreas de las columnas del primer piso se encuentra entre 0.5 y 0.99% del área del primer piso (Figura 10).

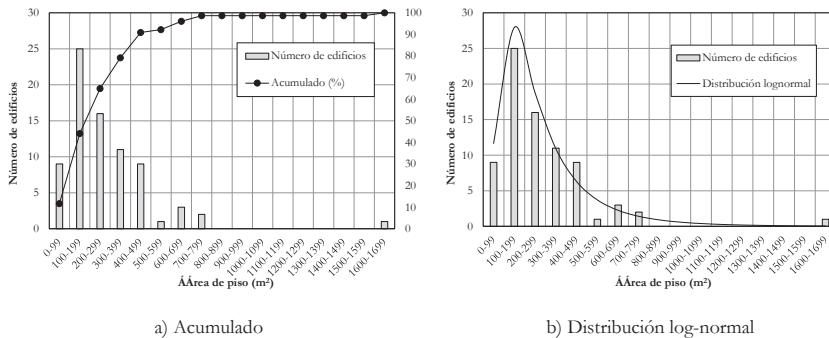


Figura 9: Distribución del área de piso (m²).

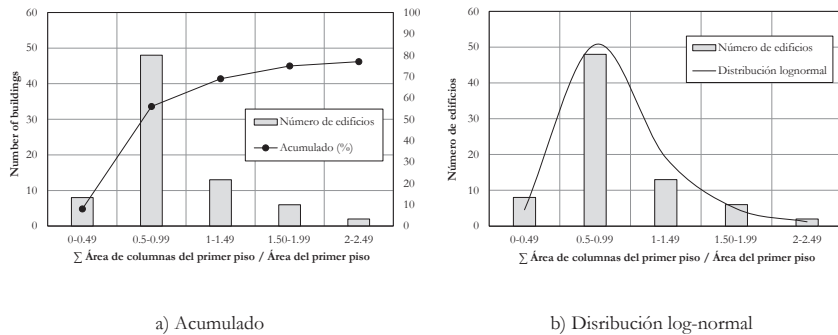


Figura 10: Distribución de la relación de la suma del área de columnas del primer piso con respecto al área del primer piso.

Por otro lado, para el 70% de los edificios, la suma del área en planta de los muros de mampostería del primer piso en la dirección principal se encuentra entre 0 y 1.99% del área de piso (Figura 11); mientras que en la dirección secundaria el 68% de los edificios tienen una relación entre la suma del área en planta de los muros de mampostería del primer piso y el área de dicho piso entre 0 y 1.99% (Figura 12).

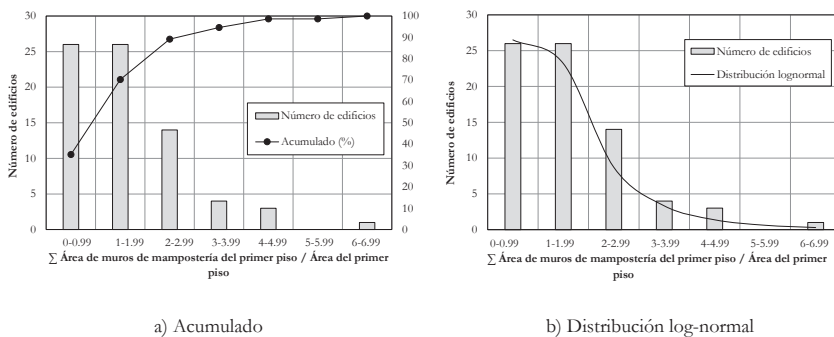


Figura 11: Distribución de la relación de la suma del área de los muros de mampostería del primer piso con respecto al área del primer piso (dirección principal).

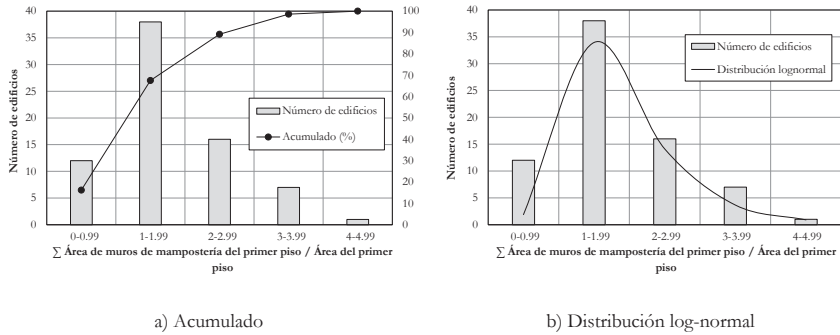


Figura 12: Distribución de la relación de la suma del área de los muros de mampostería del primer piso con respecto al área del primer piso (dirección secundaria).

La Figura 9 presenta la distribución del área del primer piso de las estructuras de la base de datos, parámetro que presentó un promedio de 280 m². Para la mayoría de los edificios (62% del total), la suma de las áreas de las columnas del primer piso se encuentra entre 0.5 y 0.99% del área del primer piso (Figura 10). Por otro lado, para el 70% de los edificios, la suma del área en planta de los muros de mampostería del primer piso en la dirección principal se encuentra entre 0 y 1.99% del área de piso (Figura 11); mientras que en la dirección secundaria el 68% de los edificios tienen una relación entre la suma del área en planta de los muros de mampostería del primer piso y el área de dicho piso entre 0 y 1.99% (Figura 12).

La Figura 13 muestra la distribución de la relación entre la aceleración espectral de diseño (S_a) y la aceleración espectral actual (según norma vigente). Se asignó un valor de cero a la aceleración espectral de diseño a aquellas estructuras construidas antes del año de 1984 (35% de las estructuras), esto debido a que antes de dicho año no existía ningún código de diseño obligatorio. El tipo de suelo de las estructuras usado en el cálculo de S_a corresponde al tipo de suelo reportado por el estudio de microzonificación sísmica del Área Metropolitana de Medellín [12]. 96% de las estructuras tienen una relación de aceleraciones espectrales (diseño/actual) menor que la unidad; 63% de las estructuras tienen una relación menor que 0.75. Es importante tener en cuenta que el factor de importancia para escuelas de la norma vigente (NSR-10) aumentó con respecto a los valores de los códigos

anteriores.

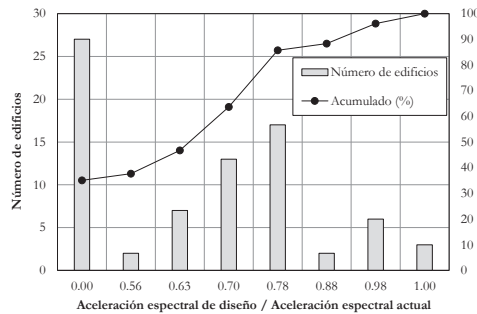
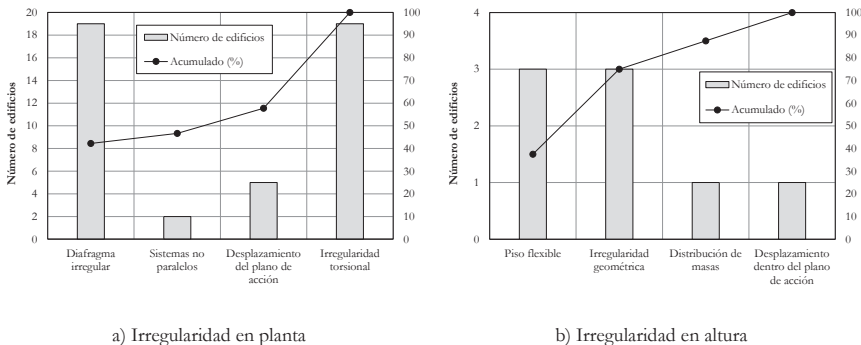


Figura 13: Distribución de la relación entre la aceleración espectral de diseño y la actual.

La Figura 14 presenta la distribución de las irregularidades en planta y en altura para los edificios irregulares. De los 77 edificios de la base de datos, 45 tienen irregularidad en planta, siendo las más comunes las irregularidades del diafragma y torsional (Figura 14a). Únicamente el 10% de los edificios encuestados presentan irregularidad en altura (ocho edificios), distribuidos según lo indica la Figura 14b.



a) Irregularidad en planta

b) Irregularidad en altura

Figura 14: Distribución de la irregularidad estructural.

4 Conclusiones

En este artículo se presentan las principales características de escuelas de pórticos de hormigón reforzado con muros de mampostería adosados ubicadas en los municipios de Medellín, Itagüí y Sabaneta (Colombia). La base de datos recopilada y analizada presenta información relevante que podría usarse para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras. Aunque las escuelas están localizadas principalmente en la ciudad de Medellín, es usual encontrar este tipo de estructuras en otras ciudades del país. Adicionalmente, esta base de datos puede ser útil para dar un indicativo de la vulnerabilidad sísmica de escuelas de Sudamérica y Centroamérica, debido a la similitud de las características estructurales en los países latinoamericanos.

Los parámetros estadísticos relacionados con las características geométricas que se presentan en este artículo podrían usarse para la generación de curvas de capacidad analíticas con la finalidad de realizar modelos de riesgo sísmico.

Dos características a resaltar de la base de datos son: i) debido a que la información fue recolectada por un número reducido de personas, incertidumbres en los criterios individuales de clasificación son reducidos, y ii) las características estructurales se han definido de acuerdo a datos de estructuras reales y no de planos arquitectónicos o estructurales.

La base de datos se beneficiaría si se aumentara el número de escuelas encuestadas. Un análisis sobre las características del inventario de estructuras de hormigón reforzado en Turquía [16] indica que una base de datos confiable para dichas estructuras la constituyen 35 estructuras para un tipo estructural dado. Aunque los autores de este informe desconocen que un estudio de este tipo se haya realizado para las escuelas colombianas, es razonable pensar que un número similar de estructuras constituye una base de datos confiable para la tipología estudiada en esta investigación.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Dirección de Investigación de la Universidad EAFIT por el apoyo económico, a las directivas de las diferentes

instituciones de educación que permitieron incluir las estructuras en la base de datos, y a los valiosos aportes del Doctor Santiago Pujol, profesor de la Universidad de Purdue, en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] United Nations Centre for Regional Development, UNCRD, *Reducing vulnerability of school children to earthquakes. A project of School Earthquake Safety Initiative (SESI)*, UNCRD, Jan. 2009. [Online]. Available: http://www.preventionweb.net/files/2951_SESIOutcomeallfinal.pdf 210
- [2] G. Coronel and O. A. López, “Regional seismic damage, loss and risk scenarios of Venezuelan schools buildings,” in *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012. 211
- [3] B. Borzi, P. Ceresa, M. Faravelli, E. Fioniri, and M. Onida, “Definition of a prioritization procedure for structural retrofitting of Italian school buildings,” in *COMPdyn 2011 III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering: An IACM Special Interest Conference, Programme. Papadrakakis M., Fragiadakis, M., Plebris, V. Corfy, Greece*. European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering, EUCENTRE, May 2011. 211
- [4] M. I. Verbicaro, D. H. Lang, M. Polese, G. M. Verderame, and G. Manfredi, “Development of structural vulnerability functions for schools and hospitals in Central American countries,” in *Proceedings of the XIII Convegno di Ingegneria Sismica (ANIDIS), Bologna, Italy*, 2009. 211, 216
- [5] F. Bendimerad, “Earthquake vulnerability of school buildings in Algeria,” in *Keeping Schools Safe in Earthquakes. Proceedings of the ad hoc Experts Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, Paris*. The Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, Feb. 2004. [Online]. Available: www.oecd.org/edu/schoolsafety 211, 216
- [6] O. A. López, J. J. Hernández, A. Marinilli, N. Fernández, J. Domínguez, T. Baloa, G. Coronel, and S. Safina, “Seismic evaluation and retrofit of school buildings in Venezuela,” in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*, Oct. 2008. 211
- [7] M. A. Ferreira and J. M. Poența, “Seismic Vulnerability Assessment of the Educational System of Bucharest,” in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*, Oct. 2008. 211

- [8] Evaluación de Riesgos Naturales, ERN-AL, “Seismic risk assessment of schools in the Andean Region in South America and Central America,” International Labor Office, Tech. Rep., Apr. 2010. 211
- [9] H. Crowley, R. Pinho, and J. J. Bommer, “A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation,” *Earthquake Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 173–219, Jan. 2004. 212
- [10] A. Hasan and A. Sözen, “Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes,” *ACI Structural Journal*, vol. 94, no. 1, pp. 31–19, Jan. 1997. 212
- [11] G. Grüntal, “European Macroseismic Scale,” Conseil de L’Europe, Chaiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, Tech. Rep., 1998. [Online]. Available: http://www.franceseisme.fr/EMS98_Original_english.pdf 212
- [12] L. F. Restrepo, M. R. Villarraga, J. D. Jaramillo, Y. Farbiarz, A. F. Vélez, D. A. Rendón, F. P. Ángel, C. P. Lalinde, F. Correa, and G. Betancur, *Microzonificación y Evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá, Medellín*. Prográficas Ltda, Dec. 2007. 213, 223
- [13] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, AIS, 2010. 214, 218
- [14] —, *Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente CCCSR-84*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, AIS, 1984. 217
- [15] —, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, AIS, 1998. 218
- [16] I. E. Bal, H. Crowley, R. Pinho, and F. Gulay, “Detailed assessment of structural characteristics of Turkish RC building stock for loss assessment models,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, no. 10, pp. 914–932, Oct. 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726107001340> 225