

Capítulo 8

Capacidad de los edificios aportricados de hormigón armado

8.1 Introducción

En este capítulo, se analiza la capacidad sísmica de un grupo de edificios aportricados de Hormigón Armado (HA) existentes en la ciudad de Manizales. Para representar la geometría y las propiedades mecánicas de los materiales de estos edificios, un grupo de ingenieros calculistas y constructores expertos en el diseño de este tipo de estructuras, desarrollaron, a partir de la información estadística proporcionada por la Oficina Municipal de Prevención y Atención de Desastres (OMPAD), 18 modelos altamente representativos de esta tipología en la ciudad. Los modelos han sido divididos en dos grupos de acuerdo a su nivel de diseño, esto es: 1) estructuras Sin Diseño Sismo Resistente (SDSR) y 2) estructuras Con Diseño Sismo Resistente (CDSR). Para ambos grupos, se definen 3 clases de edificios de acuerdo al número de niveles:

- Clase A: edificios de 5 niveles.
- Clase B: edificios de 9 niveles.
- Clase C: edificios de 13 niveles.

Dentro de cada clase se tienen diferentes configuraciones en planta y elevación, por lo tanto, se definen 3 modelos representativos por cada clase. Se hace claridad que los factores de participación que se presentan en este capítulo, están referidos a una tipología y no al conjunto de edificios existentes en la ciudad.

El capítulo comienza con una descripción de las construcciones típicas de la ciudad, junto con su evolución a través de la historia. A partir de esta información, se definen los modelos estructuras que representan los edificios aportricados de HA de la ciudad y, finalmente, se evalúa mediante un análisis estático no lineal ("análisis

pushover”) la capacidad sísmica de los edificios más representativos, que se representa por medio de espectros de capacidad.

8.2 Descripción y evolución de las construcciones

Desde su fundación en 1849, Manizales ha experimentado diferentes períodos constructivos que dejan como resultado un conjunto de edificios y viviendas que constituyen una mezcla variada de tipologías, las cuales presentan comportamientos y respuestas completamente diferentes frente a la acción sísmica. Considerando la información disponible y las metodologías expuestas en este trabajo, se han elegido los edificios aporticados de Hormigón Armado (HA) más representativos de la zona, para evaluar su vulnerabilidad y desempeño sísmico. Para ello, se han dividido estas estructuras en dos grandes grupos de acuerdo al período en que fueron construidas. Por simplicidad hemos considerado sólo dos períodos; antes y después de la aprobación por parte del congreso de la República de Colombia del primer código de construcciones sismo resistente CCCSR-84 en el año de 1983. A continuación se describen estos dos períodos.

8.2.1 Período contemporáneo: 1983-1997

Durante este período predomina el uso de los sistemas aporticados de hormigón armado para la construcción de edificios tanto en la ciudad de Manizales como en todo el territorio Nacional. Este sistema tiene una serie de ventajas desde el punto de vista arquitectónico y de facilidad constructiva, sin embargo, presenta también una serie de inconvenientes importantes debido a su excesiva flexibilidad ante sollicitaciones horizontales, lo cual conduce a una desprotección de los acabados, muy frágiles, que se utilizan a nivel nacional, como ha sido comprobado una y otra vez durante los sismos ocurridos en el país. Este aspecto ha sido resuelto a nivel mundial con el uso de muros estructurales, con el fin de limitar la flexibilidad de la estructura.

Para definir los tipos de edificios que se construyeron durante este período, se utilizó la información estadística del estudio realizado por la Oficina Municipal de Prevención y Atención de Desastres (OMPAD) durante el período comprendido entre 1991-1996. A partir de este estudio se establecen tres clases de edificios (A, B y C) que, a su vez se subdividen de acuerdo al número de niveles. En la Tabla 8.1 se presenta su distribución dentro de la muestra analizada, que contienen un total de 411 edificios.

Clase	Modelo (No.Niveles)	Rango representado	No. Edificios	Participación
A	5	4-6	377	0.91
B	9	7-10	27	0.07
C	13	11-14	7	0.02
SUMA			411	1.0

Tabla 8.1. Clases de estructuras de HA existentes según el número de niveles.

El estudio completo realizado por la OMPAD hace referencia a un total de 609 edificios, de los cuales 198 corresponden a edificios de menos de 4 y más de 14 niveles (ver Tabla 8.2), los cuales no han sido incluidos dentro de nuestras tres clases. Los edificios con más de 14 niveles, se han descartado por considerarse poco representativos de esta tipología y debido a que sólo representan el 0.5 % del total de la muestra. Por otra parte, los edificios de menos de 3 niveles, no corresponden a edificios aporricados de hormigón armado, con lo cual no pertenecen a la tipología seleccionada. Sin embargo, su alto nivel de participación dentro del parque de las construcciones existentes en Manizales, sugiere un estudio detallado de su comportamiento y respuesta frente a la acción sísmica. De la información contenida en la Tabla 8.2, está claro que el edificio aporricado de HA característico de la ciudad, es de altura mediana con menos de 6 niveles, ya que el 62% de los edificios de la muestra pertenecen a la clase A. No obstante, en algunas partes de la ciudad, como por ejemplo en el centro alrededor de la catedral, sobresalen algunos edificios altos singulares (Tipo C o mayores de 14 niveles), como puede observarse en la Figura 8.1.

Clase	No. Niveles	Participación
< 4 niveles	3	0.320
A	4 - 6	0.620
B	7 - 10	0.044
C	11 - 14	0.011
> 14 niveles	15 - 17	0.005
SUMA		1.00

Tabla 8.2. Factores de participación para cada tipo de edificio.

8.2.2 Período Pre-moderno: 1849-1983

Para el período anterior a 1983 no se dispone de estadísticas, debido a que existen dificultades al tomar un período tan extenso, dentro del cual se pueden distinguir diferentes sub-períodos con una gran variedad de tipologías. A continuación se describen brevemente los principales sub-períodos.



Figura 8.1. Centro actual de la ciudad (Aguilar, 2000).

- a) Período 1849 a 1926: coincide con los inicios de la población y la fase de asentamiento de los primeros pobladores. Para construir las viviendas y los elementos primarios tales como la plaza, la iglesia y el cementerio, se utilizaron materiales que se tenían a la mano en la región (la palma de maíz, la guadua¹, la tierra etc.). La Figura 8.2 muestra una casa de bahareque² de guadua representativa de este período.

El uso de la guadua en sus distintas variedades, se convirtió en parte integral de "todos los edificios", conformados en su mayor porcentaje por la vivienda. Su alta resistencia y dimensiones, extendieron su uso a la construcción de paredes, forjados y techos, en perfectas condiciones de adaptabilidad a un terreno con una topografía bastante abrupta. Este modelo rústico y popular permitió que durante este período, gran parte de la ciudad no se viera afectada por los terremotos que la azotaron, razón por la cual posteriormente se denominó a este tipo como "estilo temblorero", teniendo en cuenta su excelente comportamiento frente a los movimientos sísmicos (Robledo, 1986). El final de este

¹Guadua: bambú muy grueso, alto y espinoso.

²Bahareque: paredes de palos entretrejidos con cañas de bambú y barro.



Figura 8.2. Casa típica de bahareque de guadua.

período está estrechamente relacionado con los tres incendios que tuvieron lugar en la ciudad y que impulsaron a un cambio en el tipo de construcción debido al mal comportamiento del bahareque frente al fuego. El primer incendio fue en 1922 y afectó a 254 edificios del centro, el segundo en julio de 1925 destruyó 216 edificios, entre ellos el palacio de gobierno, el obispal, 4 bancos y numerosas casas, es decir, casi la totalidad del sector y, finalmente, un tercero en marzo de 1926 que destruyó por completo la vieja catedral de madera y 21 edificios de la ciudad.

- b) Período 1926 al 1945: después de los voraces incendios de 1925 y 1926, se inició un proceso de reconstrucción que dio paso a la aparición de las primeras estructuras de hormigón armado, con tabiques en bahareque, hormigón y mampostería cerámica, sin una tendencia clara. El uso de estos materiales permitió la construcción de edificaciones institucionales de estilo republicano (construcciones opulentas y excesivamente ornamentadas retomadas de corrientes Europeas), que imprimieron al centro de la ciudad, un carácter cosmopolita. Durante este período aparecen los primeros edificios, con una altura predominante de 3 niveles (ver Figura 8.3).
- c) Período 1946 - 1960: el uso de los nuevos materiales impulsa la construcción de nuevas tipologías, destacándose en este período la aparición de las primeras estructuras aporricadas de hormigón armado con forjados macizos y secciones de columnas y vigas relativamente robustas pero con poca armadura en las columnas. La altura media de estos edificios era de 4 niveles.
- d) Período 1961 - 1972: se introducen los forjados con el sistema reticular celular hasta aproximadamente 1965. A partir de este año, predominan los forjados aligerados con casetones de guadua (ver Figura 8.4), con nervaduras en



Figura 8.3. Edificios de estilo republicano construidos en el centro de la ciudad.



Figura 8.4. Detalle del sistema de aligeramiento con casetones de guadua utilizado para los forjados de los edificios de HA.

una dirección, apoyadas sobre "pórticos cargueros" y con "vigas de amarre" en dirección ortogonal, aunque no siempre presentes. Aparecen casi exclusivamente en el centro de la ciudad, los primeros edificios con alturas superiores a 6 niveles.

- e) Período 1973 - 1983: con la asimilación de los códigos norte americanos ACI-63 y ACI-71, la práctica del diseño estructural se orientó hacia el método de la rotura. Con la aplicación de estos códigos para el diseño de las estructuras y considerando que aún no se aplicaban extensamente las previsiones de diseño sismorresistente, se notó una marcada tendencia a reducir las secciones de columnas y los espesores de las losas. Adicionalmente, durante este período el gobierno Colombiano creó el sistema de Unidad de Poder Adquisitivo Constante (UPAC) de Ahorro y Vivienda, el cual disparó la construcción de la vivienda multifamiliar, (ver Figura 8.5). Durante este período, se construyeron en la ciudad una gran cantidad de edificios, que por los aspectos antes mencionados, resultan altamente vulnerables frente a la acción sísmica.



Figura 8.5. Edificio de HA de 5 niveles en las afueras de la ciudad de Manizales.

La Tabla 8.3 muestra, para cada subperíodo, una distribución razonable de la participación de las tres clases (A, B y C) consideradas para el período contemporáneo y la Tabla 8.4 da un promedio ponderado para el período histórico 1926 - 1983.

No. Niveles	Participación (Clases)			Participación Subperíodos
	A	B	C	
1926-1945	0	0	0	0.02
1946-1960	0.97	0.03	0	0.06
1961-1972	0.80	0.20	0	0.12
1973-1983	0.90	0.08	0.02	0.80

Tabla 8.3. Participación de acuerdo al número de niveles. Participación en subperíodos.

Clase	No. Niveles	Participación
A	5	0.89
B	9	0.09
C	13	0.02
SUMA		1.0

Tabla 8.4. Participación de cada tipo de edificio - Período 1926-1983.

Para la correcta interpretación de las Tablas 8.1 a 8.4, debe tenerse en cuenta que la presente estimación pseudo-estadística se refiere a edificios aporticados de hormigón armado. Por lo tanto, las participaciones de cada clase deben entenderse dentro de este sistema estructural y no dentro del total de edificaciones de la ciudad.

8.3 Definición de los modelos

Para evaluar la vulnerabilidad y el desempeño sísmico de los edificios de la ciudad de Manizales, se ha optado por definir modelos teóricos cuya geometría se considera altamente representativa de las estructuras aporticadas de HA existentes. Para ello, un grupo de ingenieros calculistas y constructores expertos en el diseño de este tipo de estructuras, desarrollaron 18 modelos de edificios, a partir de la información estadística proporcionada por la Oficina Municipal de Prevención y Atención de Desastres (OMPAD) para el período contemporáneo y utilizando la distribución supuesta para el período pre-moderno (Tabla 8.4). Los modelos han sido divididos en dos grupos que coinciden con los dos períodos constructivos identificados a nivel de diseño, esto es, antes y después de la primera normativa de diseño sismorresistente que fue aprobada como ley en el año de 1983. En adelante se utilizará la siguiente nomenclatura para los dos períodos:

- Grupo 1: estructuras Sin Diseño Sismo Resistente construidas antes de 1983, denotadas por las letras SDSR.

- Grupo 2: estructuras Con Diseño Sismo Resistente construidas después de 1983, denotadas por las letras CDSR.

Como se ha indicado antes, cada uno de los grupos se divide en 3 clases (A, B y C) de acuerdo al número de niveles. La clase A corresponde a edificios de elevación media mientras que los edificios de las clases B y C corresponden a estructuras altas. Para representar estas clases, se han definido tres tipos de edificios de 5, 9 y 13 niveles respectivamente. Dentro de cada clase, se consideran 3 modelos que varían en su configuración en planta y elevación pero conservan el número de niveles. De esta forma se tiene un total de 18 modelos estructurales que representan los edificios típicos de HA de la ciudad. La Figura 8.6 muestra esquemáticamente los modelos considerados y en la Tabla 8.5 se indican sus participaciones dentro del respectivo grupo.

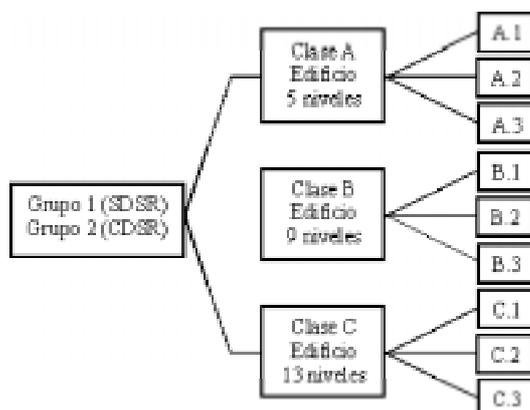


Figura 8.6. Esquema de los grupos, clases y modelos utilizados para representar los edificios de hormigón armado de la ciudad de Manizales.

Así por ejemplo, el modelo A.1 SDRS se refiere a un edificio sin diseño sismorresistente de 5 niveles y configuración estructural tipo 1.

De los 18 modelos, se han elegido como los más representativos, los modelos A.1, B.3 y C.2 por tener el factor de participación más alto dentro de las clases A, B y C respectivamente (ver Tabla 8.5 donde se han resaltado en negrita los modelos finalmente analizados). Las Figuras 8.7, 8.8 y 8.9, muestran una planta típica y un alzado de uno de los pórticos de los edificios de 5, 9 y 13 niveles respectivamente. Adicionalmente, se muestran las alturas entre pisos y algunas de las dimensiones típicas de las vigas y columnas de los pórticos. La Tabla 8.6 resume las principales características geométricas de estos modelos.

Edificio No	Clase (No. Niveles)	Participación	
		SDSR	CDSR
1	A.1 (5)	0.5	0.5
2	A.2 (5)	0.2	0.3
3	A.3 (5)	0.3	0.2
4	B.1 (9)	0.1	0.35
5	B.2 (9)	0.1	0.15
6	B.3 (9)	0.8	0.5
7	C.1 (13)	0.1	0.2
8	C.2 (13)	0.8	0.6
9	C.3 (13)	0.1	0.2

Tabla 8.5. Tipos de edificios considerados para cada grupo.

Modelo	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Área (m ²)	No. Pórticos		Participación (%)	
					Ancho	Largo	SDSR	CDSR
A.1	10	20	15.05	200	3	5	89	91
B.3	13	20	26.45	260	4	5	9	7
C.2	17.5	20	38.25	350	4	5	2	2

Tabla 8.6. Propiedades geométricas básicas de los modelos A.1, B.3 y C.2 (SDSR y CDSR). En negrita se destacan los modelos finalmente analizados.

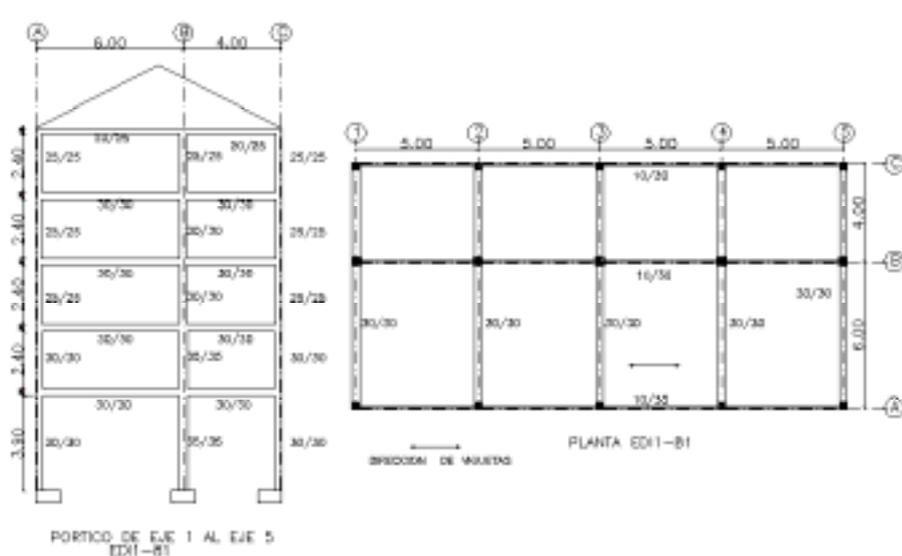


Figura 8.7. Distribución en planta y elevación del modelo de 5 niveles (A.1).

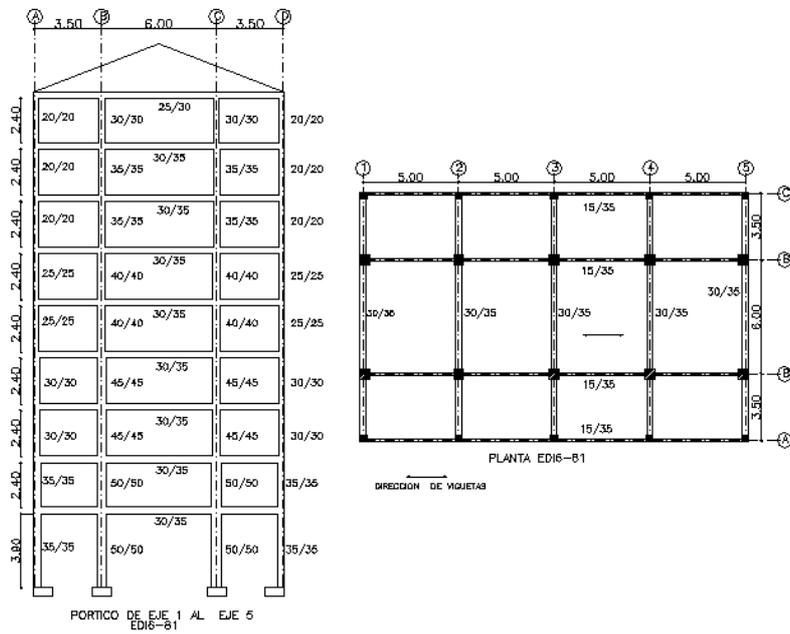


Figura 8.8. Distribución en planta y elevación del modelo de 9 niveles (B.3).

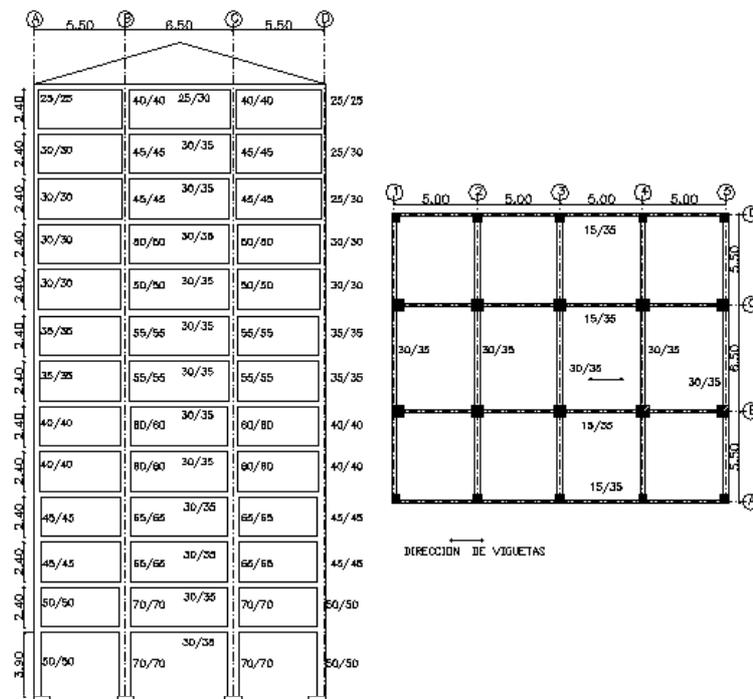


Figura 8.9. Distribución en planta y elevación del modelo de 13 niveles (C.2).

8.3.1 Parámetros de análisis y diseño

Una vez definidas las características geométricas de los modelos (configuración en planta y elevación, dimensiones de los elementos estructurales, etc.) es necesario definir los parámetros utilizados para el análisis y diseño de estos edificios. Para el primer grupo (SDSR), estos parámetros fueron asignados a partir de la información contenida en algunas memorias de cálculo y en el trabajo realizado por Gutierrez y Garcia (1995). En cuanto al segundo grupo (CDSR) los parámetros están relacionados con las recomendaciones contempladas en el primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR-84. La Tabla 8.7 resume los principales parámetros utilizados en cada grupo.

Descripción	SDSR	CDSR
1. Cargas verticales		
- Densidad del hormigón	2400 kg/m ³	
- Acabados de piso y techos	7 cm a 2200 kg/m ³	
- Losa aligerada de entrepiso	Viguetas de espesor 0.10m, separadas 0.70m centro a centro	
- Muros	300 kg/m ² . Cubierta: 100kg/m ²	
- Carga viva	150 kg/m ²	180kg/m ²
	30 kg/m ²	30 kg/m ²
2. Cargas de sismo	No se consideran	Se consideran
3. Derivas entre piso	No se verifican	Se verifican
4. Materiales		
- Hormigón	$f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$	
- Acero longitudinal	$f_y = 4220 \text{ kg/cm}^2$	
- Acero transversal	$f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$	

Tabla 8.7. Parámetros de análisis y diseño para los modelos estructurales de la ciudad de Manizales.

8.4 Capacidad sísmica

Las curvas de capacidad con el método N2, se obtienen mediante un análisis pushover y utilizando el patrón de cargas cuya distribución corresponde al primer modo de vibración de cada edificio. Para hacer el análisis se utiliza el programa RUAUMOKO 2D, a partir del cual se obtienen directamente las curvas de capacidad de los tres modelos para ambos niveles de diseño SDSR y CDSR. Sin embargo, el método requiere que estas curvas sean transformadas a un sistema de un grado de libertad equivalente (1 GDL) siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.8.3 y utilizando los parámetros que se muestran en la Tabla 8.8, donde m^* y T^* son la masa

y el período del sistema de 1 GDL equivalente, respectivamente y, Γ es el factor de participación modal.

Modelo	$m^*(kN)$	$T^*(s)$	Γ
A.1 SDSR	6225.82	1.77	1.29
A.1 CDSR	4784.83	1.26	1.31
B.3 SDSR	9919.16	1.82	1.45
B.3 CDSR	9279.21	1.46	1.51
C.2 SDSR	21095.42	2.91	1.53
C.2 CDSR	18745.81	2.10	1.55

Tabla 8.8. Parámetros del sistema de 1 GDL equivalente.

Los espectros de capacidad del sistema de 1 GDL equivalente para los tres modelos, se obtienen a partir de la ecuación (3.43) de la sección 3.8.3, que consiste en dividir las ordenadas de la curva de capacidad del sistema de 1 GDL por la masa del sistema equivalente m^* (ver Figuras 8.10 y 8.11). La comparación de estas dos Figuras, permite detectar, a simple vista, las diferencias en la capacidad de los edificios con y sin diseño sismorresistente. La Tabla 8.9 muestra el desplazamiento de cedencia D_y^* , el desplazamientos último D_u^* y la aceleración espectral en el punto de cedencia S_{ay}^* , los cuales definen la representación bilineal de estos espectros.

Modelo	$D_y^*(m)$	$S_{ay}^*(g)$	$D_u^*(m)$
A.1 SDSR	0.0600	0.077	0.237
A.1 CDSR	0.0567	0.144	0.286
B.3 SDSR	0.0508	0.057	0.278
B.3 CDSR	0.0613	0.100	0.423
C.2 SDSR	0.0817	0.039	0.302
C.2 CDSR	0.1000	0.064	0.499

Tabla 8.9. Parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad.

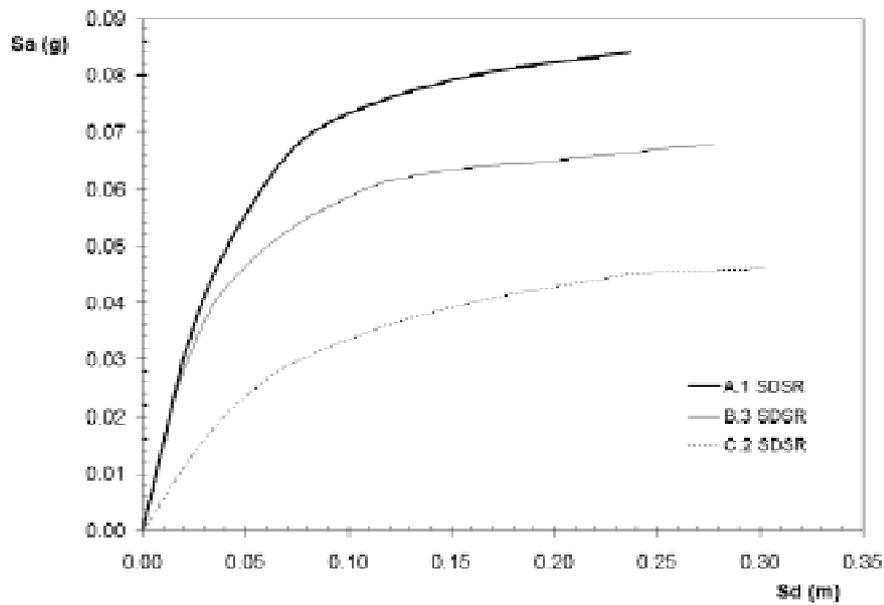


Figura 8.10. Espectros de capacidad de los sistemas de MGDL de los edificios SDR.

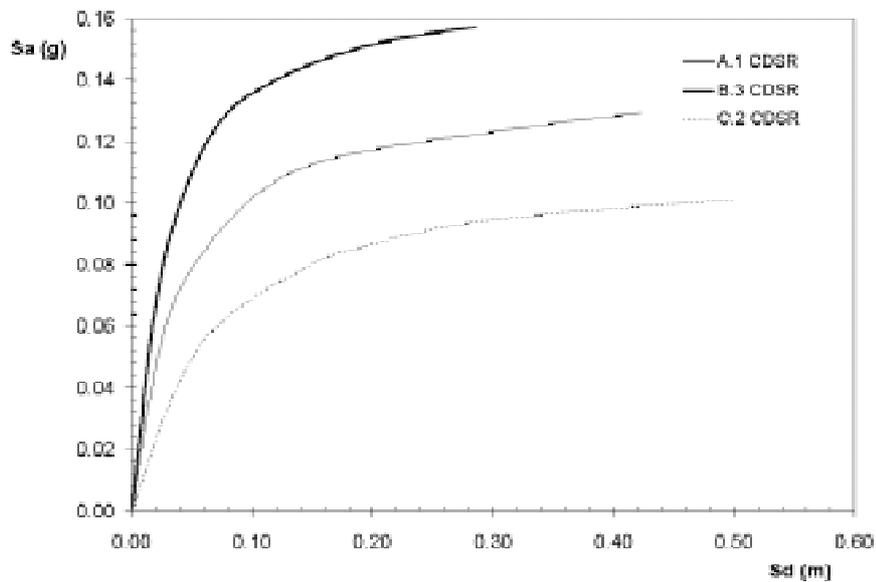


Figura 8.11. Espectros de capacidad de los sistemas de MGDL de los edificios CDR.

8.5 Resumen y discusión

La ciudad de Manizales presenta una gran variedad de tipologías constructivas, como consecuencia de las diferentes técnicas y de los diversos materiales utilizados desde su fundación. En este trabajo, se han clasificado las estructuras existentes dentro de dos períodos básicos: 1) el período pre-moderno (1849-1983) y 2) el período contemporáneo (1983-1997). El primero de ellos, corresponde a un período bastante amplio, dentro del cual, se presentan una gran variedad de tipologías, que van desde las primeras construcciones en bahareque de guadua, hasta los edificios de hormigón armado con losas aligeradas, diseñados a partir de las recomendaciones de los códigos americanos ACI-63 y ACI-71. El comportamiento sísmico de las estructuras construidas durante este período, es muy variable. Así pues, se ha podido observar durante varios sismos, que el desempeño de los sistemas más antiguos (bahareque de guadua), ha sido mucho mejor que el resto de las tipologías. Durante este período, no existía en el país ninguna normativa sísmica que regulara el diseño de las construcciones a nivel nacional, por lo tanto, la gran mayoría de las construcciones pertenecientes al período pre-moderno, no tienen en cuenta ninguna consideración sísmica en el diseño. En cuanto al segundo período, puede decirse en términos generales, que predominan las estructuras aporticadas de hormigón armado. El inicio de este período coincide con la entrada en vigencia del primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (CCCSR-84).

En este trabajo, se analiza el comportamiento sísmico de los edificios aporticados de hormigón armado. Se ha elegido este tipo de edificios, considerando la información disponible, el avance del conocimiento sobre el comportamiento sísmico de esta tipología y las herramientas disponibles para su modelado. Para representar estos edificios, se definen 18 modelos teóricos a partir de la información suministrada por la Oficina Municipal de Prevención y Atención de Desastres (OMPAD) y el criterio y la experiencia de ingenieros expertos en el diseño y construcción de edificios en la ciudad de Manizales. Los modelos se dividen en dos grupos y tres clases de acuerdo al nivel de diseño y al número de niveles respectivamente. Así, se consideran los edificios diseñados antes (SDSR) y después (CDSR) del primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (CCCSR-84). Por otra parte, las tres clases (A, B y C) corresponden a edificios de 5, 9 y 13 niveles, respectivamente. Dentro de cada clase se han considerado hasta tres tipos (1,2,3). De estos tipos, se ha elegido el más representativo de cada clase para los dos grupos, es decir, que en total se analizan 6 modelos estructurales (A.1, B.3 y C.2 SDSR y CDSR).

La capacidad estructural de los 6 modelos elegidos, se evalúa mediante un análisis estático no lineal ("análisis pushover") y se representa, por medio de una curva de capacidad. Esta curva relaciona el cortante en la base de la estructura con el máximo desplazamiento en la parte superior del edificio. Para evaluar posteriormente el desempeño de estos edificios, se utilizan las propiedades modales de un sistema de un grado de libertad equivalente, para convertir esta curva, en un espectro de

capacidad.

De los espectros de capacidad obtenidos para los 6 modelos, se concluye que la incorporación del diseño sismorresistente, conduce a un aumento considerable tanto de los niveles de aceleración espectral como de la deformación máxima alcanzada antes de que se produzca el colapso. Por lo tanto, es de esperar que, el desempeño de los edificios con diseño sismorresistente sea mucho mejor que el de los edificios que no cuentan con ninguna consideración sísmica.