

Influencia del Espesor en la Capacidad de Disipación de Energía de Muro de Edificación Tipo
Túnel de Máxima Altura Permitida en Zona de Amenaza Sísmica Alta Según NSR-10

Silvia Juliana Meza Infante y Emma Yiseth Hernández Vargas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Civil

Director

Álvaro Viviescas Jaimes

Ph. D. ingeniería civil

Codirector

Carlos Felipe Orduz Suárez

Ingeniero civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Agradecer me ha permitido tener presente todo. Mi gratitud infinita a Dios y las personas que me han acompañado en este camino, esto es por ustedes.

A mi madre por su esfuerzo, su amor y sus palabras que me dieron fuerza en los momentos más difíciles, a ella le debo este logro.

A Carlos que ha sido el mejor papá, hermano y amigo. Es quien ha sido mi fuerza y mi ejemplo de un mundo mejor.

A Juan por su apoyo incondicional, sus enseñanzas, por ser luz, guía y felicidad en este camino. A mi amor, gracias por soñar y caminar a mi lado.

A todas las amistades que me dejó esta etapa y las cuales aportaron a mi crecimiento tanto personal como profesionalmente.

Esto es posible gracias a ustedes.

Silvia Juliana Meza

Dedicatoria

Al único y sabio Dios.

A mis padres Gelvis y María, por su amor y sacrificio en todos estos años.

A mis hermanas Marcela y Ángela, por su apoyo y compañía incondicional.

Emma Hernández

Agradecimientos

Expresamos nuestro especial agradecimiento al director del proyecto el profesor Álvaro Viviescas Jaimes y el codirector Felipe Orduz por su confianza, orientación, apoyo y acompañamiento durante la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, por permitir la culminación de esta meta, como miembro de tan importante institución. A la escuela de ingeniería civil y sus docentes nuestra admiración y agradecimiento por ofrecer sus conocimientos con el fin de formarnos profesionalmente.

Silvia Juliana Meza Infante

Emma Yiseth Hernández Vargas

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Análisis estático no-lineal pushover	14
3. Caso de estudio	15
3.1. Descripción general	15
3.3. Cargas	17
3.4. Demanda sísmica	18
3.5. Modelo tridimensional	19
3.6. Ajuste de los resultados	20
3.7. Verificación de derivas	20
3.8. Diseño del muro	21
3.8.1 Parámetros generales	21
3.8.2 Solicitaciones de diseño.....	22
3.8.3 Cuantías mínimas.....	22
3.8.4 Capas de refuerzo.....	23
3.8.5 Refuerzo horizontal.....	23
3.8.6 Refuerzo longitudinal.....	24

3.8.7 Diseño elementos de borde	26
4. Variación del espesor	28
5. Modelado no lineal	32
5.1 Modelos constitutivos de los materiales	32
5.1.1 Acero.....	33
5.1.2 Concreto.....	35
6. Análisis pushover.....	36
7. Cálculo coeficiente de disipación de energía r	39
8. Conclusiones.....	41
9. Recomendaciones	43
Referencias bibliográficas.....	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Resistencia de los concretos utilizados	17
Tabla 2. Magnitud de carga sobrepuesta (kN/m ²).....	17
Tabla 3. Magnitud de carga viva (kN/m ²).....	18
Tabla 4. Respuesta modal	20
Tabla 5. Características del muro (m).....	22
Tabla 6. Valores de la envolvente.....	22
Tabla 7. Refuerzo a cortante	24
Tabla 8. Refuerzo elemento de borde	27
Tabla 9. Resumen de diseño muro 15cm	27
Tabla 10. Respuesta modal edificación con muros de 12cm	28
Tabla 11. Características muro de 12cm.....	29
Tabla 12. Resumen de diseño muro 12cm	29
Tabla 13. Respuesta modal edificación con muros de 20cm	30
Tabla 14. Características muro de 20cm.....	31
Tabla 15. Resumen de diseño muro 20cm	31
Tabla 16. Propiedades del acero	35
Tabla 17. Propiedades malla electrosoldada.....	35
Tabla 18. Valores de cortante último, cortante de primera fluencia y R	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Planta estructural de la edificación.....	16
Figura 2. Espectro de diseño.....	18
Figura 3. Modelo tridimensional en ETABS	19
Figura 4. Derivas de piso	21
Figura 5. Diagrama de interacción.....	25
Figura 6. Derivas de piso edificación con muros de 12cm.....	29
Figura 7. Derivas de piso edificación con muros de 20cm.....	31
Figura 8. Curva esfuerzo-deformación para el acero.....	34
Figura 9. Curva esfuerzo-deformación para el concreto.....	36
Figura 10. Modelo muro de 15cm en SAP2000	37
Figura 11. Diagrama de esfuerzos en la base muro 15cm	38
Figura 12. Curvas de capacidad.....	38

Resumen

Título: Influencia del Espesor en la Capacidad de Disipación de Energía de Muro de Edificación Tipo Túnel de Máxima Altura Permitida en Zona de Amenaza Sísmica Alta Según NSR-10*

Autor: Emma Yiseth Hernández Vargas, Silvia Juliana Meza Infante**

Palabras Clave: Sistema túnel, Muros delgados de concreto reforzado, Análisis estático no-lineal, Coeficiente de capacidad de disipación de energía.

Descripción:

En los últimos años el uso de muros de concreto reforzado ha logrado consolidarse como uno de los sistemas estructurales de mayor acogida para la construcción de edificaciones altas, mediante la implementación de sistemas constructivos industrializados, como el sistema tipo túnel, debido a las ventajas constructivas y económicas de este sistema. Sin embargo, algunos sismos ocurridos en las últimas décadas como el de Chile, 2010 y Nueva Zelanda, 2011, han evidenciado tipos de fallas no deseados en estos elementos estructurales. Este documento presenta los resultados del análisis no-lineal de tres muros rectangulares de concreto reforzado, con el fin de determinar la capacidad de disipación de energía de muros esbeltos en función de su espesor. Las características del muro de referencia se obtuvieron del análisis sísmico de una edificación existente de máxima altura permitida según la NSR-10, localizada en la ciudad de Bucaramanga, considerada zona de amenaza sísmica alta. Los espesores evaluados corresponden a 12cm, 15cm y 20cm, tomados a partir de una base de datos de edificaciones construidas mediante la técnica tipo túnel, con altura de quince y veinte pisos. Se encontró que para todos los espesores el coeficiente de capacidad de disipación de energía arroja valores inferiores al especificado por la NSR-10.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. Ph.D. Ingeniero Civil. Codirector: Carlos Felipe Orduz Suárez. Ingeniero Civil

Abstract

Title: Influence of Thickness on the Energy Dissipation Capacity of Tunnel-Type Building Wall of Maximum Permitted Height in High Seismic Hazard Zone According to NSR-10*

Author: Emma Yiseth Hernández Vargas, Silvia Juliana Meza Infante **

Key Words: Tunnel system, Thin reinforced concrete walls, Non-linear static analysis, Coefficient of energy dissipation capacity.

Description:

In recent years, the use of reinforced concrete walls has managed to consolidate itself as one of the most popular structural systems for the construction of tall buildings, through the implementation of industrialized construction systems, such as the tunnel type system, due to the constructive advantages and economic of this system. However, some earthquakes that have occurred in recent decades, such as the one in Chile, 2010 and New Zealand, 2011, have shown types of unwanted failures in these structural elements. This document presents the results of the non-linear analysis of three rectangular reinforced concrete walls, in order to determine the energy dissipation capacity of slender walls as a function of their thickness. The characteristics of the reference wall were obtained from the seismic analysis of an existing building with the maximum height allowed according to NSR-10, located in the city of Bucaramanga, considered a high seismic hazard zone. The evaluated thicknesses correspond to 12cm, 15cm and 20cm, taken from a database of buildings built using the tunnel-type technique, with a height of fifteen and twenty stories. It was found that for all thicknesses the energy dissipation capacity coefficient yields values lower than that specified by the NSR-10.

* Degree Work

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director: Álvaro Viviescas Jaimes. PhD. Ingeniero Civil. Codirector: Carlos Felipe Orduz Suárez. Ingeniero Civil

Introducción

La construcción de edificaciones altas mediante el sistema tipo túnel en Bucaramanga (Colombia) ha aumentado en los últimos años, como respuesta a la creciente demanda de vivienda. Estas edificaciones están compuestas por muros delgados y losas macizas de CR, donde es habitual el uso de refuerzo en forma de mallas electrosoldadas (Yuksel & Kalkan, 2007)(Rondón, 2011). El uso del sistema túnel se ha popularizado, principalmente, por la reducción de los costos y tiempos de construcción, además de la mano de obra y el consumo de materiales, frente a otros sistemas, pues los muros portantes suelen usarse a su vez como muros divisorios (Construdata, 2010).

Muros de CR han sido utilizados desde hace tiempo, no solo en Colombia sino en Latinoamérica y gran parte del mundo, pues se considera que este sistema presenta un buen desempeño ante cargas laterales ocasionadas por acciones sísmicas (Yuksel & Kalkan, 2008), debido a que poseen gran rigidez y buena capacidad de deformación, que son factores importantes para un buen comportamiento ante sismos (Alcocer, 1995). Sin embargo, los eventos sísmicos recientes en Chile 2010 (J. U. B. Moehle, R. U. C. Riddell, 2010) y Nueva Zelanda 2011 (Gavin et al., 2011), dejaron en evidencia fallas no deseadas en muros de CR, que en algunos casos llegaron a comprometer la estabilidad de las edificaciones. De acuerdo con estudios posteriores a estos eventos, los daños observados están asociados a elevada carga axial, espesores delgados de los muros, armadura de confinamiento inadecuada e irregularidades verticales (Wallace et al., 2012) (Jünemann, de la Llera, Hube, Cifuentes, & Kausel, 2015). Las fallas evidenciadas en los

muros estructurales despertaron interés en cuanto a las normas de diseño sismorresistente y al estudio del comportamiento de dichos elementos, no solo en los países directamente afectados, sino de la comunidad científica en general.

El estudio del comportamiento sísmico de muros estructurales se puede realizar mediante el uso de modelos numéricos considerando el comportamiento de los materiales, ya sea en el rango lineal o no-lineal y los sismos como fuerzas estáticas o dinámicas. Una forma de conocer el comportamiento de elementos y estructuras es a través de la curva de capacidad, la cual se puede obtener mediante un análisis estático no-lineal (Durante, Martinez & Santamaria, 2017) (Delgadillo, 2005).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se estudió en este proyecto de investigación, la influencia del espesor en la capacidad de un muro de una edificación tipo túnel, localizada en la ciudad de Bucaramanga, catalogada como zona de amenaza sísmica alta (Maldonado & Chio Cho, 2005). Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron tres diseños para un muro rectangular de una edificación existente (caso de estudio), empleando espesores de 12cm, 15cm y 20cm, y se determinó la curva de capacidad y el coeficiente de disipación de energía R en cada caso, mediante un análisis estático no-lineal (pushover).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar la influencia del espesor en la capacidad de disipación de energía de un muro de un caso de estudio de una edificación con altura máxima permitida por la NSR10, construida mediante el sistema tipo túnel y localizada en Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

Seleccionar de la base de datos del proyecto de investigación 1895 un caso de estudio de una edificación con altura máxima permitida por la NSR-10, construida mediante el sistema tipo túnel y localizada en Bucaramanga.

Realizar el análisis estático no-lineal (pushover) del muro del caso de estudio con mayor cortante en la base y sus variaciones de espesor, con el fin de calcular el coeficiente de capacidad de disipación de energía “R”.

Comparar el coeficiente de capacidad de disipación de energía “R” para los diferentes espesores de muro estudiados.

2. Análisis estático no-lineal pushover

El análisis estático no-lineal, conocido también como pushover o método de plastificación progresiva, es un modelo matemático que incorpora directamente las características de deformación no-lineal de los elementos. El método consiste en someter las estructuras a cargas laterales crecientes monotónicas, hasta alcanzar el desplazamiento objetivo. La distribución de cargas laterales representa las fuerzas de inercia en un sismo, y el desplazamiento objetivo representa el desplazamiento máximo probable de la estructura (Asce et al., 2000). El resultado de un análisis pushover es la curva de capacidad, la cual caracteriza el comportamiento de la estructura, representando los desplazamientos de techo y el cortante en la base (García, 2015).

Existen distintas formas de pushover. Entre las más usadas se encuentran, el Modal Pushover Analysis (MPA), que se usa principalmente en estructuras de plantas asimétricas para obtener una mejor estimación de la demanda sísmica, y el Non-linear Static Pushover (NLSP), que se basa en el modo fundamental de la estructura, cuyas características permanecen constantes después de que la estructura incurra en el comportamiento no-lineal (S. B. Yuksel & Kalkan, 2008). En esta investigación se empleó este último.

Se debe tener en cuenta que el análisis pushover (NLSP) no considera los cambios en las características dinámicas de la estructura, pues el efecto del sismo se modela como una carga estática patrón (Asce et al., 2000), y la distribución del patrón de carga se basa en la forma del modo fundamental, limitando las respuestas del método al no tener en cuenta modos superiores

importantes para la respuesta (Leslie, 2017). Sin embargo, teniendo en cuenta la regularidad de la estructura y los fines de estudio, se considera válido asumir este método de análisis.

Para determinar la curva de capacidad mediante el método NLSP, se debe determinar un patrón de carga lateral y el modo fundamental, e incluir las cargas por gravedad en el modelo matemático. El modelo debe ser discretizado para representar la respuesta de deformación de cada componente a lo largo de su longitud, y así, identificar ubicaciones de acciones inelásticas (Asce et al., 2000). Los patrones de carga lateral son proporcionales al producto de la masa y la forma del modo fundamental, definido a partir de un modelo elástico (ATC-40, 1996). En el modelo, primero actúan las cargas gravitacionales, produciendo las primeras deformaciones, y luego actúan las cargas laterales que se incrementan secuencialmente, hasta llevar al fallo la estructura.

Algunos programas computacionales, realizan este tipo de análisis y determinan la curva de capacidad, a partir de un número de iteraciones del método. Entre estos programas, se encuentra SAP2000®v20, que incluye la implementación del FEMA 356 y el elemento área por capas no-lineal (Layered Shell), permitiendo modelar el comportamiento plástico de elementos finitos de área como son los muros de CR (Más, Mayor, Interacción, & Sub, 2012).

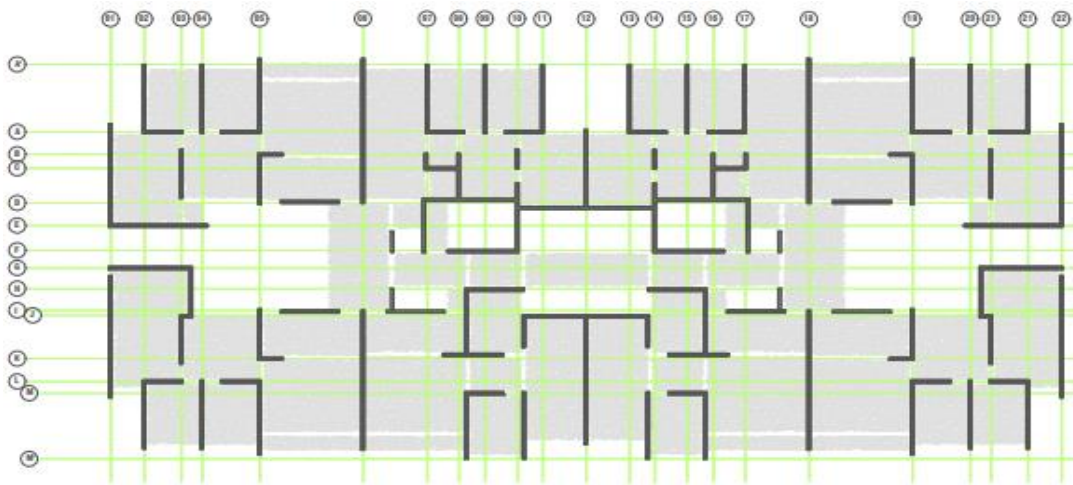
3. Caso de estudio

3.1. Descripción general

La edificación estudiada se localiza en la ciudad de Bucaramanga, es de uso residencial y se encuentra sobre un perfil de suelo tipo C. Tiene veinte pisos de 2.5m, para una altura total de 50m. Su estructura está compuesta por muros de 15cm de espesor y losas de entrepiso de 10cm. La densidad de muros en la dirección X es de 2.09% y en la dirección Y es de 4.14%.

Figura 1

Planta estructural de la edificación



3.2. Materiales

En la Tabla 1, se muestra la resistencia del concreto de los diferentes elementos de la estructura. Para el refuerzo se empleó un acero de 420MPa (NTC-2289, 2007) (Carlos, Gonzáles, Botero, & Rochel, 2005) para las barras corrugadas y malla electrosoldada de 648MPa (NTC-5806, 2010) (Carrillo & Arteta, 2019).

Tabla 1*Resistencia de los concretos utilizados*

Elemento	f'_c (MPa)
Muros piso 1-12	35
Muros piso 13-20	28
Losa	28
Vigas	28
Escaleras	21

3.3. Cargas

Las cargas consideradas sobre la estructura corresponden al peso propio, carga sobreimpuesta y viva. El peso propio corresponde al peso de los elementos estructurales, la carga sobreimpuesta se refiere al peso de los elementos permanentes en la estructura (muros divisorios, acabados, redes y afinados de piso) y la carga viva constituye la carga de ocupación y uso de la edificación, determinada de acuerdo con lo establecido en la NSR-10 numeral B.4.

Tabla 2*Magnitud de carga sobreimpuesta (kN/m²)*

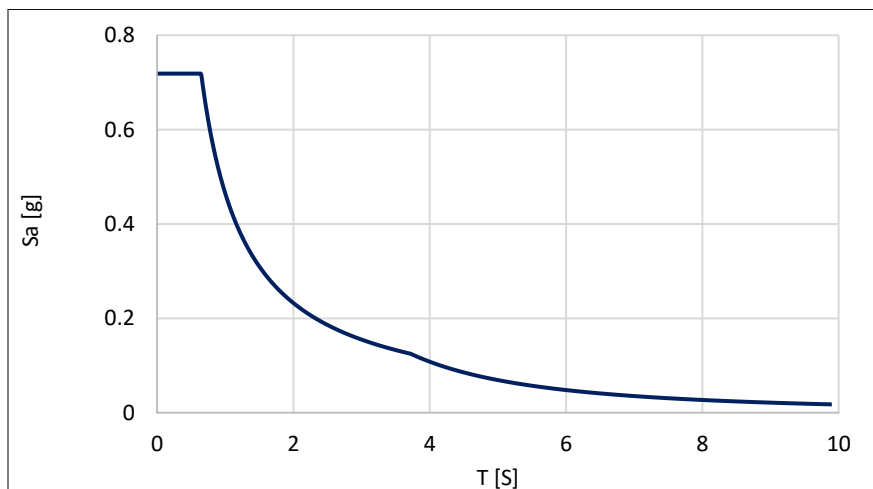
Carga Muerta	
Mortero	0.33
Porcelanato	0.22
Estuco inferior	0.05
Redes	0.03
Acabados	0.63
Muros divisorios	1.6

Tabla 3*Magnitud de carga viva (kN/m²)*

Carga viva	
Cuartos y corredores	1.8
Balcones	5.0

3.4. Demanda sísmica

La demanda sísmica de la estructura se obtuvo con base en el espectro de diseño, definido de acuerdo con el numeral A.2.6 de la NSR-10. El espectro de diseño elástico propuesto se calculó a partir de las características de la zona sísmica donde se encuentra la estructura. En la Figura 2 se muestra el espectro de diseño correspondiente a la ciudad de Bucaramanga.

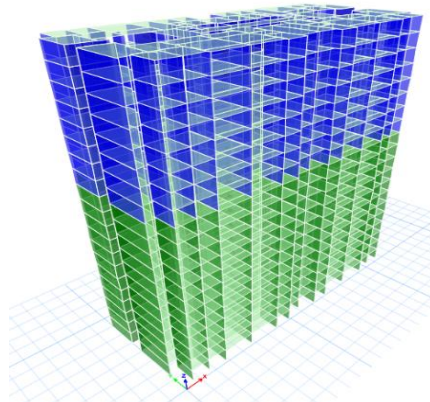
Figura 2*Espectro de diseño*

3.5. Modelo tridimensional

El análisis sísmico se realizó en el software ETABS®v20. En el modelo se representaron los elementos estructurales según la geometría en los planos, suministrados por el grupo INME. Se asignaron diafragmas rígidos por piso y se consideraron los apoyos perfectamente empotrados. Se incorporaron al modelo las escaleras de la edificación, con rotulas en los apoyos, para no considerar un aporte de rigidez por parte de estos elementos.

Figura 3

Modelo tridimensional en ETABS



Las cargas sobreimpuestas se asignaron sobre las losas, distribuidas uniformemente, de tal manera que de las losas se transmitieran a los demás elementos estructurales. El análisis modal espectral se realizó teniendo en cuenta los parámetros contemplados en la NSR-10 numeral A.5.4. En la Tabla 4, se muestran las respuestas modales donde participa más del 90% de la masa total de la estructura.

Tabla 4*Respuesta modal*

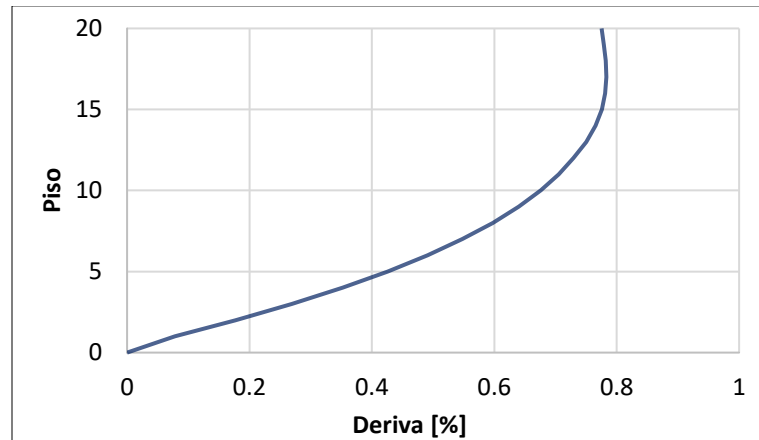
p	T [s]	UX [%]	UY [%]	RX [%]	RY [%]	RZ [%]
1	1,41	0,05	0,00	0,00	0,03	0,59
2	1,38	0,05	0,64	0,36	0,03	0,59
3	1,07	0,67	0,64	0,36	0,34	0,64
4	0,28	0,77	0,64	0,36	0,49	0,73
5	0,26	0,77	0,83	0,61	0,49	0,73
6	0,25	0,86	0,83	0,61	0,65	0,83
7	0,12	0,91	0,83	0,61	0,76	0,83
8	0,11	0,91	0,90	0,74	0,76	0,83
9	0,10	0,91	0,90	0,74	0,76	0,90
10	0,08	0,94	0,90	0,74	0,83	0,90
11	0,06	0,94	0,93	0,82	0,83	0,90
12	0,06	0,94	0,93	0,82	0,83	0,93

3.6. Ajuste de los resultados

Según los parámetros establecidos en el numeral A.5.4.5 de la NSR-10, se realizó la verificación del cortante dinámico respecto al cortante sísmico, calculado mediante el método de la fuerza horizontal equivalente (FHE) contemplado en el título A.4 de la NSR-10

3.7. Verificación de derivas

A continuación, se muestran los resultados de la deriva para la edificación.

Figura 4*Derivas de piso*

3.8. Diseño del muro

El muro a diseñar corresponde al de mayor cortante en la base según los resultados del análisis sísmico de la edificación, y las solicitaciones de diseño corresponden a cada una de las combinaciones de carga descritas en el título B.2.4. Los valores de carga axial (P_u), cortante (V_u) y momento (M_u), corresponden a los valores máximos absolutos de las solicitaciones (envolvente). El diseño se realizó teniendo en cuenta los requisitos contemplados en el título C del reglamento. A continuación, se muestra el procedimiento de diseño.

3.8.1 Parámetros generales

En la Tabla 5 se presentan las características del muro a diseñar.

Tabla 5*Características del muro (m)*

Espécimen	Muro 15cm
Ht	50
hw	2.5
lw	7.1
bw	0.15

3.8.2 Solicitaciones de diseño

En la Tabla 6, se presentan los valores absolutos de las sollicitaciones para el diseño.

Tabla 6*Valores de la envolvente*

Pu [kN]	Vu [kN]	Mu [kN/m]	δu [mm]
3208	491	11076	0,372
3265	491	12201	0,372
7351	482	12076	0,394
7428	482	13179	0,394

3.8.3 Cuantías mínimas

El valor tomado de cuantía mínima de refuerzo horizontal y vertical para cortante fue de 0.0025 de acuerdo con C.11.9.9.2 y C.21.9.2.1.

3.8.4 Capas de refuerzo

De acuerdo con el numeral C.21.9.2.3 se determinó el número de capas de refuerzo a emplear en función de la fuerza cortante mayorada de la sección (V_u). Aunque el valor de V_u no excedió el límite, se dispusieron dos capas de refuerzo.

$$V_u \geq 0.17 \lambda A_{cv} \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

3.8.5 Refuerzo horizontal

El refuerzo horizontal se determinó de acuerdo con lo dispuesto en C.11.9, donde se encuentran las disposiciones especiales de diseño a cortante para muros. El diseño está basado en las ecuaciones 2 y 3.

$$\phi V_n \geq V_u \quad (2)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (3)$$

Siendo V_n la resistencia nominal al cortante, V_c la resistencia nominal a cortante del concreto, calculada de acuerdo con C.11.9.5 y C.11.9.6 y V_s la resistencia nominal del refuerzo de cortante, calculada de acuerdo con C.11.9.9.1.

Con base en lo anterior se calculó la cuantía de refuerzo distribuido en el alma, cuyo valor correspondiente fue de 0.0025 en ambos casos. A partir de la cuantía requerida para el diseño, se determinó el espaciamiento y diámetro de barras de la malla electrosoldada.

Tabla 7

Refuerzo a cortante

ρ	$\rho_{req.}$	Refuerzo sum	$\rho_{sum.}$
ρ_t	0.0025	Malla 7mm c/200mm	0.0026
ρ_t			

Finalmente se comprobó que para la cuantía suministrada se cumpliera C.21.9.4.1.

$$Vu \leq A_{cv} \left(\alpha_c \lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y \right) \quad (4)$$

3.8.6 Refuerzo longitudinal

El refuerzo longitudinal se determinó de acuerdo con lo estipulado en C.10.2 y C.10.3, donde se establecen las disposiciones para el diseño de elementos sometidos a flexión y carga axial.

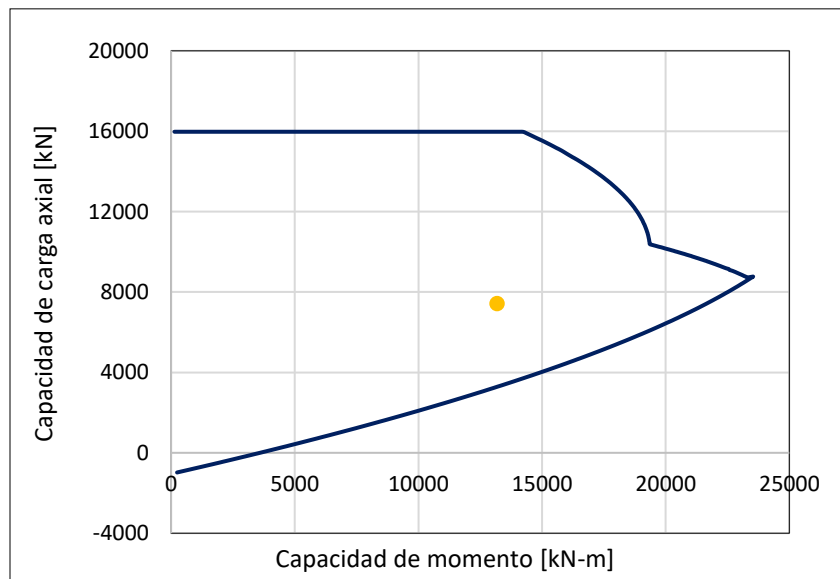
El método de diseño tiene en cuenta las siguientes hipótesis (Nilson, 2001):

- Las secciones planas antes de la deformación, permanecen planas después de la deformación según el principio de Bernoulli.
- Se conoce la curva esfuerzo – deformación para el acero y se desprecia el endurecimiento por deformación.
- Se desprecia la resistencia a tracción del concreto.
- La curva esfuerzo-deformación del concreto define el esfuerzo a compresión.

A partir de las hipótesis de diseño y considerando una distribución rectangular equivalente de esfuerzos en el concreto, se calculó el diagrama de interacción del muro, para el refuerzo establecido por cortante en dirección longitudinal, satisfaciendo la condición de equilibrio en el centro plástico de la sección transversal.

Figura 5

Diagrama de interacción



3.8.7 Diseño elementos de borde

Según C.21.9.6.2, se deben incluir elementos de borde cuando:

$$c \geq \frac{Lw}{600(\delta u/hw)} \quad (5)$$

Así mismo, teniendo en cuenta C.21.9.6.3 se deben tener elementos de borde cuando el esfuerzo de compresión máximo de la fibra extrema sobrepase $0.2f'_c$. El esfuerzo de compresión máximo se calculó a partir de la ecuación 6:

$$\sigma = \frac{Pu}{Ag} + \frac{Mu (Lw/2)}{Ig} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta los criterios anteriormente mencionados, se determinó que el muro requiere elemento de borde para las dos condiciones, y se calculó la longitud horizontal mínima según C.21.9.6.4.

El área de acero requerido para los elementos de borde, se calculó a partir del análisis de diseño de secciones simplemente reforzadas, asumiendo que el acero a compresión y tracción se concentra en la mitad del elemento de borde, se obtuvo un área de refuerzo longitudinal $A_s = 6277 \text{ mm}^2$.

Tabla 8*Refuerzo elemento de borde*

A_s req	Refuerzo longitudinal	A_s sum
6277 mm^2	32b#5@160 mm, dispuesto en 2 filas	6368 mm^2

El refuerzo transversal de borde se extiende a lo largo de la altura del muro, y se dispusieron estribos cerrados de confinamiento rectilíneos de diámetro 9.5 mm, separados cada 50mm, cumpliendo lo dispuesto en los numerales C.21.6.4 y C.21.9.6.4.

El procedimiento anteriormente descrito se realizó para cada nivel a fin de obtener el diseño final del muro en la totalidad de su altura.

Tabla 9*Resumen de diseño muro 15cm*

Piso	1-8	9-12	13-20
Capas de refuerzo	2	2	2
Malla en ambas direcciones	7mm c/200 mm	7mm c/200 mm	7mm c/200 mm
	Cuantía		
	0.0026	0.0026	0.0026
Refuerzo vertical E.B	16#5 c/160 mm	9#4 c/175 mm	
	Cuantía		No requiere
	0.017	0.010	
Refuerzo horizontal E.B	e#3 c/50 mm	e#3 c/50 mm	No requiere

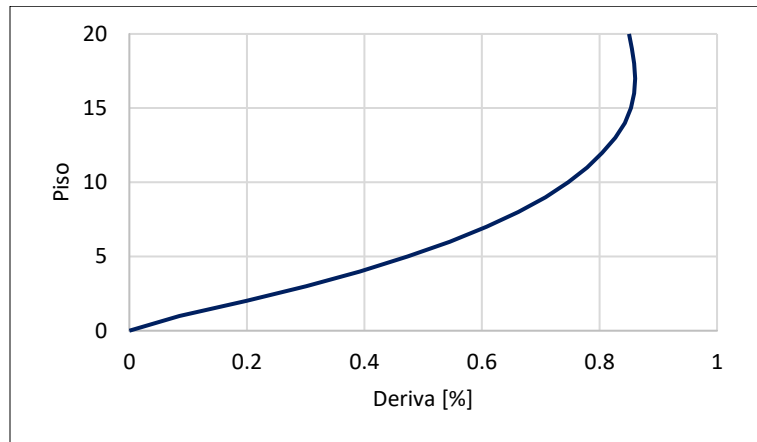
4. Variación del espesor

A partir del caso de estudio se realizó una variación en el espesor de los muros estructurales de la edificación, a 12cm y 20cm. Estos valores corresponden a los espesores menor y más frecuente, respectivamente, encontrados en edificaciones de muros de entre quince y veinte pisos en Bucaramanga, de acuerdo con la base de datos del grupo INME de este tipo de edificaciones. A continuación, se muestran los resultados del análisis sísmico de la edificación para cada espesor, y el diseño correspondiente del muro en estudio para cada caso, teniendo en cuenta el proceso descrito en la sección anterior.

Tabla 10

Respuesta modal edificación con muros de 12cm

p	T [s]	UX [%]	UY [%]	RX [%]	RY [%]	RZ [%]
1	1,49	0,05	0,00	0,00	0,03	0,59
2	1,46	0,05	0,64	0,36	0,03	0,59
3	1,14	0,67	0,64	0,36	0,33	0,64
4	0,30	0,77	0,64	0,36	0,50	0,73
5	0,28	0,77	0,83	0,61	0,50	0,73
6	0,27	0,86	0,83	0,61	0,65	0,83
7	0,13	0,91	0,83	0,61	0,76	0,84
8	0,11	0,91	0,90	0,74	0,76	0,84
9	0,11	0,91	0,90	0,74	0,76	0,90
10	0,08	0,94	0,90	0,74	0,83	0,90
11	0,06	0,94	0,93	0,82	0,83	0,90
12	0,06	0,94	0,93	0,82	0,83	0,93

Figura 6*Derivas de piso edificación con muros de 12cm***Tabla 11***Características muro de 12cm*

Espécimen	m
Ht	50
hw	2.5
lw	7.1
bw	0.12

Tabla 12*Resumen de diseño muro 12cm*

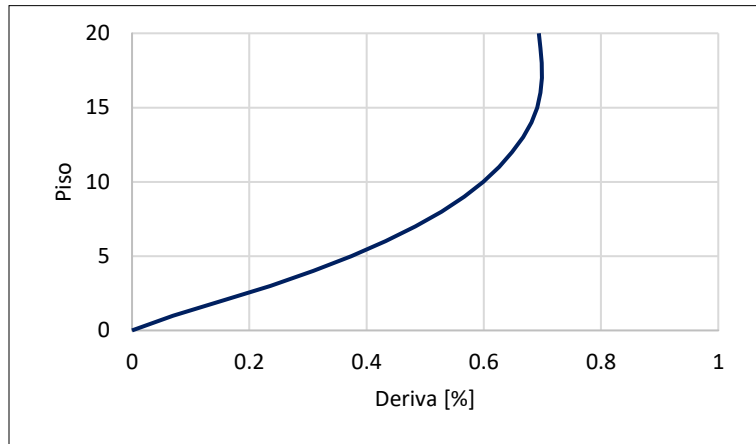
Piso	1-8	9-13	14-20
Capas de refuerzo	2	2	2
	7mm c/250 mm	7mm c/250 mm	7mm c/250 mm

Malla en ambas direcciones	0.0026	Cuantía 0.0026	0.0026
Refuerzo vertical E.B	16#5 c/180 mm	10#4 c/190 mm	No requiere
	0.019	Cuantía 0.012	No requiere
Refuerzo horizontal E.B	e#3 c/40 mm	e#3 c/40 mm	No requiere

Tabla 13

Respuesta modal edificación con muros de 20cm

p	T [s]	UX [%]	UY [%]	RX [%]	RY [%]	RZ [%]
1	1,32	0,05	0,00	0,00	0,03	0,59
2	1,29	0,05	0,64	0,37	0,03	0,59
3	0,99	0,67	0,64	0,37	0,34	0,64
4	0,26	0,76	0,64	0,37	0,49	0,73
5	0,24	0,76	0,83	0,61	0,49	0,73
6	0,23	0,86	0,83	0,61	0,65	0,83
7	0,11	0,91	0,83	0,61	0,75	0,83
8	0,10	0,91	0,90	0,74	0,75	0,83
9	0,10	0,91	0,90	0,74	0,76	0,90
10	0,07	0,94	0,90	0,74	0,83	0,90
11	0,05	0,94	0,93	0,82	0,83	0,90
12	0,05	0,94	0,93	0,82	0,83	0,93

Figura 7*Derivas de piso edificación con muros de 20cm***Tabla 14***Características muro de 20cm*

Espécimen	m
Ht	50
hw	2.5
lw	7.1
bw	0.20

Tabla 15*Resumen de diseño muro 20cm*

Piso	1-8	9-13	14-20
Capas de refuerzo	2	2	2
Malla en ambas direcciones	7mm c/150 mm	7mm c/150 mm	7mm c/150 mm
	Cuantía		

	0.0026	0.0026	0.0026
Refuerzo vertical E.B	16#5 c/125 mm	No requiere	
	Cuantía		
	0.016		
Refuerzo horizontal E.B	e#3 c/65 mm	No requiere	

5. Modelado no lineal

Se realizaron los modelos de los tres muros descritos en la sección anterior, en SAP2000®v20. Los modelos no-lineales de los muros se realizaron con elementos tipo área Shell layered al primer nivel y a partir del segundo nivel con elementos tipo Shell thick. Se consideró rigidez total en el suelo mediante empotramientos perfectos en la base del muro y se asignó comportamiento no-lineal a los materiales de acuerdo con los modelos constitutivos descritos a continuación.

5.1 Modelos constitutivos de los materiales

El comportamiento no-lineal de los materiales se consideró los siguientes modelos constitutivos.

5.1.1 Acero

Se utilizó el modelo de Park y Paulay, Figura 8, (Paulay & Park, 1983), en el cual para la curva esfuerzo-deformación se caracterizan tres zonas. En la primera, la curva presenta un comportamiento lineal, llamada zona elástica que finaliza en el denominado punto de fluencia. La pendiente de la curva en esta zona es el modulo elástico del material, E_s . Los esfuerzos en el material se determinan a partir de la siguiente ecuación:

$$f_s = E_s * \epsilon_s \quad (7)$$

Y el esfuerzo de fluencia:

$$f_y = E_s * \epsilon_y \quad (8)$$

Posteriormente el acero tiene un comportamiento plástico. Esta zona tiene pequeñas variaciones, pero puede aproximarse a una zona plana denotada como zona de fluencia. Finalmente, el siguiente tramo presenta un comportamiento en el que las deformaciones aumentan a mayor velocidad que los esfuerzos, la cual se denota como zona de endurecimiento por deformación, definida por la siguiente ecuación:

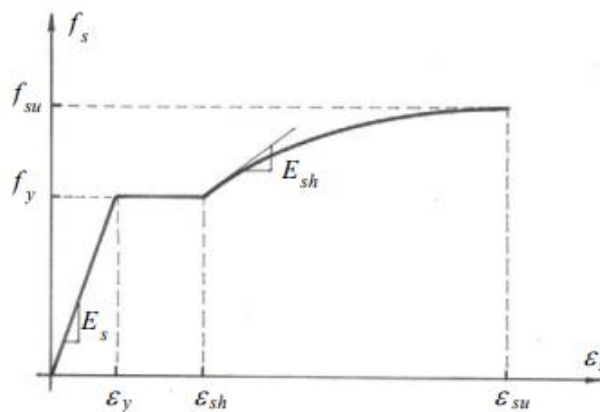
$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^p \quad (9)$$

En donde P se calcula seleccionando un punto intermedio en la zona de endurecimiento por deformación (ϵ_{sh1}, f_{sh1})

$$P = \frac{\log\left(\frac{f_{su} - f_{sh1}}{f_{su} - f_y}\right)}{\log\left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh1}}{\epsilon_{su} - \epsilon_y}\right)} \quad (10)$$

Figura 8

Curva esfuerzo-deformación para el acero



Nota. Tomado de "Reinforced Concrete Structures," por Park, R. and Paulay, T, 1983, John Wiley and Sons, Inc., Canadá.

Los valores que se suministraron al software para el acero grado 60 se asumieron de la investigación realizada por V. González et al. (González et al., 2005).

Tabla 16*Propiedades del acero*

Esfuerzo límite de fluencia, F_y	431.2 MPa
Esfuerzo máximo, F_u	618.7 MPa
Deformación al inicio del endurecimiento, ϵ_{sh}	0.0045
Deformación asociada al esfuerzo máximo, ϵ_{su}	0.0948

Para la malla electrosoldada se asumieron los valores del estudio realizado por J. Carrillo et al. (Carrillo & Arteta, 2019).

Tabla 17*Propiedades malla electrosoldada*

Esfuerzo límite de fluencia, F_y	648 MPa
Esfuerzo máximo, F_u	691 MPa
Deformación al inicio del endurecimiento, ϵ_{sh}	0.0286
Deformación asociada al esfuerzo máximo, ϵ_{su}	0.095

5.1.2 Concreto

Se implementó del modelo de Mander, Figura 9, el cual considera el principio de que el concreto confinado y no confinado poseen diferencias en su comportamiento, mostrando que el primero presenta una mayor resistencia a la compresión y mayor capacidad de deformación.

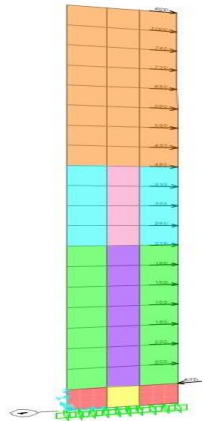
Este modelo es aplicable a secciones rectangulares y establece una serie de parámetros que se desarrollan en función de las áreas confinadas y no confinadas, del tipo de confinamiento y de

Se realizó el análisis estático no-lineal de los tres especímenes de muro con el fin de comparar sus curvas de capacidad.

Para el modelo se incorporó al programa la geometría y el refuerzo de cada piso, incluyendo elementos de borde de acuerdo con la Tabla 9, Tabla 12 y Tabla 15. También, se tuvo en cuenta la resistencia a la compresión del concreto de acuerdo con la Tabla 1. Esto con el fin de obtener una respuesta aproximada al comportamiento real.

Figura 10

Modelo muro de 15cm en SAP2000



Se asignó un patrón de cargas laterales, correspondientes al modo fundamental de acuerdo a lo establecido en el FEMA 440 (FEMA 440, 2005), también se asignó un patrón de cargas muertas, la cual se tomó de una combinación de la carga sobrepuesta, la carga muerta y 0.25 de carga viva. Para esta combinación se tomaron las fuerzas de la parte superior de cada nivel del muro del modelo lineal de la estructura.

A continuación, se muestran los resultados de los diagramas de esfuerzo para el paso del análisis pushover en el cual se presenta la primera fluencia, ubicada en la zona del elemento de borde, y la curva de capacidad de cada modelo.

Figura 11

Diagrama de esfuerzos en la base muro 15cm

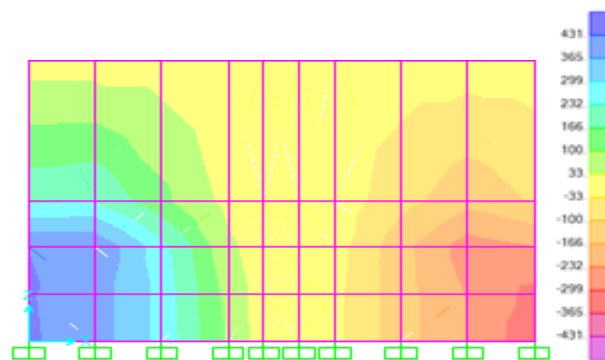
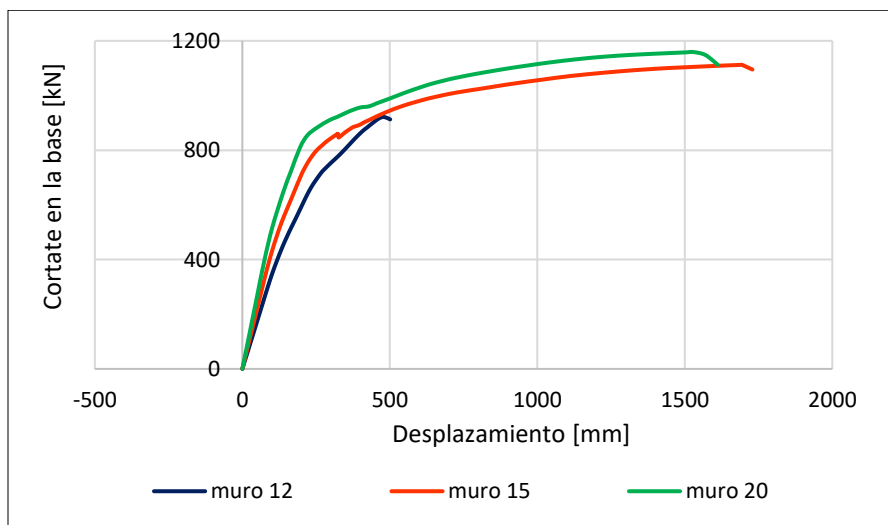


Figura 12

Curvas de capacidad



Según los resultados de la Figura 12, se puede evidenciar que el muro de 12cm presenta una menor capacidad en comparación con los otros muros, esto puede ser debido a que es difícil garantizar buen confinamiento en un espesor tan reducido, como se ha demostrado en estudios realizados (Arteta et al. , 2018). A pesar que la longitud del elemento de borde era mayor para este modelo, el no confinamiento del concreto reduce la resistencia y ductilidad del elemento afirman algunos autores como Mander y Alcocer (Mander, Priestley & Park, 2008) (Alcocer, 1995).

El muro de 15cm presenta menor resistencia, pero mayor capacidad de desplazamiento lateral que el muro de 20cm. Esto puede ser debido a que el modelo de 15cm presenta mayor longitud de elemento de borde, haciendo que la longitud correspondiente de refuerzo con malla electrosoldada en el alma sea menor, y según estudios realizados los muros reforzados con mallas electrosoldadas presentan menor ductilidad de desplazamiento (Arteta, Carrillo & Diaz, 2019).

7. Cálculo coeficiente de disipación de energía R

Dentro del diseño sismorresistente se suele reducir la demanda sísmica por el factor de reducción R, al considerar el daño estructural como medida de disipación de energía (Arteta et al., 2018).

Para este estudio, el cálculo del R se realizó a partir de las curvas de capacidad de cada uno de los modelos, según la propuesta de NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program)

(FEMA P-1050, 2015) (Valencia y Valencia, 2008), que calcula el R a partir del factor de sobrerresistencia (R_Ω) y el factor de reducción por ductilidad (R_μ).

$$R = R_\Omega R_\mu \quad (11)$$

Siendo R_Ω , considerado como la reserva de capacidad post-fluencia:

$$R_\Omega = V_y / V_d \quad (12)$$

donde V_y es la capacidad máxima de fluencia y V_d el cortante de diseño elástico que actúa cuando se presenta la primera fluencia.

Y, R_μ la fuerza disipada mediante deformación plástica:

$$R_\mu = V_e / V_y \quad (13)$$

donde V_e es el cortante sísmico estimado por el método elástico.

Por tanto, R será igual a:

$$R = V_e / V_d \quad (14)$$

En la tabla 18, se muestran los resultados del coeficiente R para cada uno de los modelos.

Tabla 18

Valores de cortante último, cortante de primera fluencia y R

Muro	Ve [kN]	Vd [kN]	R
Muro 12cm	2078	664.22	3.13
Muro 15cm	2229	720.29	3.09
Muro 20cm	2481	941.45	2.64

Según la NSR-10 Tabla A.3-1 el R de diseño para muros de concreto con capacidad DES es de 5. Ninguno de los modelos cumple este criterio, pues los valores de R son menores de 5. El R de los muros de 15cm y 20cm, disminuyo un 1.28% y un 15.65%, respectivamente, en comparación con el muro de 12cm. Estos resultados están en la dirección de lo obtenido por Bonett et al., donde se determinaron valores de R inferiores a 3.3 para edificaciones de muros delgados de CR. Por tanto, el valor recomendado por la NSR-10 puede generar sobre-estimación de la capacidad de este tipo de edificios y por consiguiente a unas fuerzas sísmicas de diseño inferiores a las que deberían ser utilizadas (Bonnet et al. , 2019).

8. Conclusiones

Se tomó un caso de estudio de la base de datos de edificios de muros, de entre 15 y 20 pisos de altura, localizados en el área metropolitana de Bucaramanga del grupo de investigación INME. Se seleccionó una estructura de 20 pisos con 50m de altura, correspondiente a la altura máxima permitida según la NSR-10, para estructuras de muros con capacidad especial de disipación de energía (DES), la estructura presenta una distribución en planta con mayor densidad de muros en la dirección Y con un 4.14%, contra un 2.09% en la dirección X. Los muros en su totalidad son de 15cm de espesor, reforzados con mallas electrosoldadas y elementos de borde, reforzados con barras de acero corrugadas de acuerdo con C.3.5 de la NSR-10. Según el análisis sísmico de la edificación, esta cumple con los requisitos de deriva según la NSR-10, siendo la deriva máxima de la estructura de 0.78%. Así mismo, para las dos variantes de espesor en los muros a 12cm y 20cm, la deriva máxima no sobrepasa el límite, con valores correspondientes a 0.86% y 0.70% respectivamente.

Se determinó el valor del coeficiente R de tres muros con espesores de 12, 15 y 20 centímetros. Según los resultados del análisis de la curva de capacidad, el valor del coeficiente R de los tres modelos no sobrepasa el coeficiente R de diseño definido en la NSR-10, para muros estructurales con capacidad (DES), cuyo valor es de 5. El muro de 12cm de espesor presenta un R de 3.13, el muro de 15cm un R de 3.09 y el de 20cm un R de 2.64, lo que representa un porcentaje por debajo del definido en el reglamento del 37.4%, 38.1% y 47.3%, respectivamente. Estos resultados difieren al R determinado por la NSR-10, lo que conlleva a una sobre-estimación en la capacidad de estos elementos estructurales y al uso de fuerzas sísmicas de diseño inferiores a las que podría estar sometida la estructura.

Se encontró que el coeficiente R disminuye al aumentar el espesor, debido a que los modelos con espesores mayores presentan fuerzas superiores asociadas a la primera fluencia.

La estructura con muros de 12cm de espesor cumplió los requisitos de deriva. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el muro correspondiente a este espesor presentó una respuesta con baja capacidad de ductilidad, comportamiento que puede deberse a que en espesores muy reducidos no se garantiza un buen confinamiento.

9. Recomendaciones

Se recomienda que es necesario realizar análisis más detallados que evalúen la respuesta del muro de acuerdo al comportamiento sísmico de la estructura, como podría ser un pushover de combinación modal, en donde se pueda obtener una respuesta del elemento en la cual se involucren los modos de vibración para los cuales se complete una participación de la masa total del 90% de la estructura, o un análisis cronológico tiempo historia. Finalmente, los resultados obtenidos para el modo de vibración fundamental de la estructura en la cual participo más del 60% de la masa nos da una respuesta aproximada del comportamiento del elemento estructural perteneciente a la edificación en estudio.

Es importante tener en cuenta que los resultados del análisis no lineal no dependen únicamente de la variable espesor, puesto que, la longitud, cuantía y detallado del elemento de borde difieren para cada variante de espesor del muro, factores importantes que intervienen en la respuesta, en cuanto a resistencia y capacidad de deformación.

Referencias Bibliográficas

- Alcocer, S. M. (1995). Alcocer (1).pdf. En *Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado* (pp. 272–291). México, D.F.
- Applied Technology Council (ATC-55 Project). (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. *Fema 440*, (2005), 392.
- Arteta, C., Blandón, C., & Bonett, R. (2018). *Estudio del Comportamiento Sísmico de Edificios de Muros Delgados de Concreto Reforzado*. (002), 1–106.
- Asce, T., Project, P., Team, P., Committee, A. S., Rehabilitation, S., Committee, A. S., ... Register, A. O. (2000). *FEMA 356 Prestandard November 2000*. (November).
- ATC-40. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings.pdf*.
- Carlos, J., Gonz, V., Botero, J. C., & Rochel, R. (2005). *Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia*.
- Carrillo, J., & Arteta, C. A. (2019). *Tensile mechanical properties of the electro-welded wire meshes available in Bogotá, Colombia*. (January).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.096>
- Construdata, R. (2010, marzo). Informe especial- Estructuras con Muros de Concreto. *Revista Construdata Ed.143*, P.87. Recuperado de <https://issuu.com/legissa2010/docs/ed.143>
- Delgadillo, J. (2005). *Análisis no lineal estático de estructuras y la norma E-030*. Universidad Nacional de Ingeniería.

- Durante Bonilla, C. E., Martínez Chavarria, M. E., & Santamaria Diaz, J. J. (2017). “*Análisis Estático No Lineal (PUSHOVER) Del Cuerpo Central Del Edificio De La Facultad De Medicina De La Universidad De El Salvador*.” 205.
- García, D. (2015). *Análisis Pushover en Muros de Corte: Estado del Arte y Aplicación*. Universidad Industrial de Santander.
- Gavin, H., Marshall, J., Mayes, R., Gumpertz, S., Springs, C., Tom, C., & Rourke, O. (2011). *The M 6 . 3 Christchurch , New Zealand , Earthquake of February 22 , 2011*. (May).
- Li, V., & Papers, R. (2015). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures. II*.
- J. U. B. Moehle, R. U. C. Riddell, and R. U. C. B. (2010). *8.8 Chile Earthquake of February 27, 2010*. 10(June), 1–20.
- Jünemann, R., de la Llera, J. C., Hube, M. A., Cifuentes, L. A., & Kausel, E. (2015). A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures*, 82, 168–185. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.014>
- Leslie, R. (2017). *Effect of Lateral Load Patterns in Pushover Analysis*. (November 2009).
- Maldonado, E., & Chio Cho, G. (2005). *Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga*. (2).
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (2008). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Más, P., Mayor, E. Y. D. E., Interacción, D. E. E. E., & Sub, P. O. R. (2012). *SAP2000 Modelado y Cálculos de estructuras a través de Elementos Finitos*.
- Nilson, A. H., & L, L. E. Y. (2001). *Diseño de estructuras de concreto*.

NTC-2289. (2007). *Norma Técnica Colombiana*.

NTC-5806. (2010). *Norma Técnica Colombiana*. (571).

Paulay, R. P. y T. (1983). *Estructuras-de-Concreto-Reforzado-Park-and-Paulay.pdf*.

R. Bonnet, J. Carrillo, C. B. (2018). *EVALUACIÓN DEL FACTOR R PARA EDIFICIOS DE MUROS DELGADOS Y ESBELTOS EN SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS EVALUATION OF DUCTILITY REDUCTION FACTORS FOR THIN AND*. (1).

Rondón, A. . (2011). *Sistema estructural tipo tunel: Análisis de su comportamiento bajo acciones sísmicas*. Universidad Católica Andres Bello.

Valencia, D., Gabriel, R., & Clement, V. (2008). *Evaluación del coeficiente de disipación de energía , R , para algunos tipos de estructuras de acero Evaluating response modification factor (R) for some types of steel*. 28, 41–49.

Wallace, J. W., Massone, L. M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C., & Moehle, J. (2012). Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1), 281–299. <https://doi.org/10.1193/1.4000047>

Yuksel, S. B., & Kalkan, E. (2008). Failure mechanism of shear-wall dominant multi-story buildings. *WIT Transactions on the Built Environment*, 97, 337–346. <https://doi.org/10.2495/HPSM080351>

Yuksel, S. Bahadir, & Kalkan, E. (2007). Behavior of tunnel form buildings under quasi-static cyclic lateral loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 27(1), 99–115. <https://doi.org/10.12989/sem.2007.27.1.099>