

Evaluación De Vulnerabilidad Sísmica en Edificaciones con Sistema de Muros Vaciados de 5
Pisos

David Ricardo Chaparro Triana

Trabajo de Grado para Optar el título
de Especialista en Estructuras

Director
Carlos Alberto Riveros Jerez
Ingeniero civil, master of engineering, doctor of engineering

Universidad Industrial de Santander
Especialización en Estructuras
Escuela Fisicomecánicas
Facultad de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2020

Dedicatoria

Gracias a Dios porque me ha permitido superar muchos obstáculos y adversidades, me ha brindado la ayuda y la fuerza necesaria para continuar en este camino llamado vida. También agradezco a mis padres, quienes han sido pilar fundamental en mi vida, fuente de apoyo incondicional en lo emocional y económico; a mi hermana por su compañía y entrega durante mi crecimiento personal y profesional; al Ing. Carlos Riveros por el tiempo, la paciencia y la dedicación al corregir y ser guía durante el proceso de aprendizaje en el transcurso de la especialización; a la familia FX Functional Xtreme y Team Cross FX, fuente de salud mental y física; y a cada una de las personas que comparten el día a día conmigo, pues son ellos los que hacen más fácil mi diario vivir y quienes hacen parte de esta nueva etapa profesional de mi vida.

David Ricardo Chaparro Triana

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a todas y cada una de las personas, e instituciones que contribuyeron en la elaboración del presente documento, quienes con sus valiosos aportes, hicieron posible obtener de una manera sencilla y práctica los resultados y conceptos aquí consignados.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Institución de formación superior sede de la Especialización en Estructuras.

CARLOS ALBERTO RIVEROS JEREZ, Ingeniero Civil, Master of Engineering, Doctor of Engineering y director del proyecto.

Tabla De Contenido

Introducción-----	14
1.Objetivos -----	18
1.1 Objetivo General-----	18
1.2 Objetivos Específicos-----	18
2. Cuerpo del trabajo-----	19
2.1 Metodología-----	19
3. Muros industrializados de concreto reforzado con bajos espesores -----	20
3.1 Generales -----	20
3.1.1 Tipificación según la geometría -----	24
Muros robustos-----	29
4. Normativas en estudio -----	40
4.1 Norma Norteamericana ACI 318-14: Requisitos de reglamento para concreto estructural-----	41
4.2 Normas técnicas complementarias para el diseño por sismo y construcción para estructuras en concreto (NTC-RSEE)-----	42

4.2.1 Factor de reducción -----	43
4.2.2 Factor de comportamiento sísmico -----	44
4.2.3 Dimensionamiento de muros de ductilidad alta ($Q = 4$)-----	47
4.3. Norma técnica E.030 diseño sismo-resistente -----	51
(E.030 Norma Técnica de Diseño Sismo Resistente , S,f) , Normativa de Perú -----	51
4.3.1 Muros -----	52
4.4 Eurocódigo – 8, 2003 (Europa) -----	57
Cuantías mínima y máxima de la armadura vertical en muros-----	62
Cuantía mínima de la armadura horizontal en muros -----	63
4.5 Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. -----	65
4.5.1 Empleo del coeficiente de disipación de energía, R -----	65
4.5.2 Capacidad de disipación de energía mínima Requerida -----	67
4.5.3 Valor máximo de R permitido -----	67
4.5.4 Combinación de sistemas estructurales en planta (NSR-10 , S,f)-----	68
4.5.5 Reducción del valor de R para estructuras irregulares y con ausencia de redundancia -	69
4.5.6 Características y especificaciones mínimas para el diseño de muros según la NSR-10	69
5.Análisis de aplicación del coeficiente de disipación de energía R -----	77
5.1 Prescripciones de la norma Sismo - Resistente (NSR-10) para el diseño de muros estructurales de concreto reforzado -----	80

5. Caso en Estudio -----	82
6. Análisis de Resultados -----	93
7. Conclusiones -----	103
Referencias Bibliográficas -----	109

Lista de Tablas

Tabla 1 Coeficiente básico de reducción R_o norma E.030.....	53
Tabla 2 Valores sugeridos para el factor básico de reducción de respuesta q_o	58
Tabla 3 Valores sugeridos para el factor básico de reducción de respuesta q_o	59
Tabla 4 Variación del coeficiente de disipación de energía R	66
Tabla 5 Verificación de cumplimiento de derivas entre normativas	99
Tabla 6 Resumen de las derivas del piso	100
Tabla 7 Resumen de espesores mínimos permitidos según cada normatividad	101

Lista de Figuras

Figura 1 Edificio de sistema de muros vaciados.....	23
figura 2 performance, analysis and design of flexural concrete Wall.....	24
Figura 3 Secciones transversales de muros estructurales	26
Figura 4 Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado muros estructurales ...	28
Figura 5 Modos de falla por corte en muros robustos	30
Figura 6 Respuesta histeretica de un muro controlado por cortante.....	32
Figura 7 Respuesta histeretica de un muro dúctil.....	32
Figura 8 Efecto de distribución del refuerzo y de la cuantía en la resistencia a flexión y en la curvatura.	33
Figura 9 Distribución del acero de refuerzo longitudinal en la sección transversal de un muro ..	34
Figura 10 Deformación ante cargas laterales de un pórtico, un muro y un sistema dual	36
Figura 11 Clasificación de muros, según su distribución en planta.....	37
Figura 12 Muros discontinuos	38
Figura 13 Resistencia al corte, afectada por aberturas en muros.....	39
Figura 14 Tipos de muros acoplados	40
Figura 15 Diagrama de momento flexionante de diseño para muro	50
Figura 16 Normas técnicas complementarias para diseño por sismo	51
Figura 17 Cuantía de acero en bordes no confinados	57
Figura 18 Espectros elásticos de diseño, riesgo sísmico 1	57
Figura 19 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad bajo.....	61
Figura 20 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad alto, modo de falla predominante por cortante.	61
Figura 21 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad alto, modo de falla predominante por flexión.	61

Figura 22 Espectros de factores de reducción.....	62
Figura 23 Visualización del modelo de la edificación en estudio	84
Figura 24 Planta tipo para la edificación en estudio de 5 pisos con muros delgados localizado en zona de amenaza sísmica alta colombiana.....	84
Figura 25 Secciones de muros y losa en nivel de cubierta	85
Figura 26 Secciones de muros y losa en nivel de piso tipo	85
Figura 27 Dimensiones de un muro de concreto reforzado	88
Figura 28 Ejemplos típicos de respuesta, junto el tipo de edificios que pueden verse más afectados	90
Figura 29 Tabla 8: Periodos modales.....	97
Figura 30 Tabla 9: Participación de masa modal	98

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN EDIFICACIONES CON SISTEMA DE MUROS VACIADOS DE 5 PISOS

AUTORES: DAVID RICARDO CHAPARRO TRIANA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

PALABRAS CLAVES: MUROS DE CONCRETO ARMADO, MUROS DELGADOS, MUROS INDUSTRIALIZADOS, MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA, COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE FUERZAS SÍSMICAS.

DESCRIPCIÓN: La construcción de edificaciones con muros industrializados ha tenido buena acogida dentro del mercado, y se ha venido implementado en diferentes países, debido a que este sistema representa facilidad y rapidez al momento de construir. Sin embargo, se ha creado incertidumbre por el desempeño de este tipo de muros al momento de ser sometido a eventos sísmicos, ya que se ha considerado que estos pueden desarrollar fallas frágiles, como pandeos laterales fuera del plano, rotura del refuerzo y aplastamiento del concreto, llevando al no desarrollo de la capacidad de desplazamiento y de ductilidad supuesta en los diseños. Este estudio presenta el análisis de una edificación convencional de 5 pisos en una zona de amenaza sísmica alta con muros de delgados, para la cual se verificaron los cambios que se puedan efectuar al realizar variaciones en los coeficientes de disipación de energía, la afectación que puedan generar en el diseño y los posibles ajustes y mejoras que se pueden realizar a la norma NSR-10 con base en otras normativas internacionales (ACI-318-14 – normatividad norteamericana, NTC-RSEE – normatividad mexicana, E.030 – normatividad peruana, Eurocódigo 8 – normatividad europea). El análisis de espesor mínimo de muros y tipo de refuerzo también se presenta. Finalmente, se tienen en cuenta para el presente estudio algunas de las modificaciones que se han realizado al decreto 926 de 2010 (NSR-10), y que han sido introducidas en los decretos 2525 del 13 de julio de 2010, 092 del 17 de enero de 2011, 340 del 13 de febrero de 2012 y 945 del 5 de junio de 2017.

Trabajo de grado

Facultad de Fisicomecánica, Escuela de Ingeniería Civil, Director Carlos Alberto Riveros Jerez

ABSTRACT.

TITLE: SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT IN BUILDINGS WITH A 5- STORY HOLLOW WALL SYSTEM

AUTHORS: DAVID RICARDO CHAPARRO TRIANA

KEYWORDS: ARMED CONCRETE WALLS, SLIM WALLS, INDUSTRIALIZED WALLS, LIMITED DUCTILITY WALLS, COEFFICIENT FOR REDUCTION OF SEISMIC FORCES.

The construction of buildings with industrialized walls has been well received within the market economy, and has been implemented in different countries, because this system represents ease and speed at the time of construction. However, uncertainty has been created for the performance of this type of wall when subjected to seismic events, since it has been found that such walls can develop fragile failure, such as out of plane failure, rupture of the reinforcement and crushing of the concrete, not leading to the development of displacement capacity and assumed ductility in designs.

This study presents an analysis study of a conventional 5-story building in high seismic zone using thin walls, changes in the energy dissipation capacity coefficients are verified, modifications in the design, and possible adjustments and improvements that can be made to the NSR-10 standard based on other international regulations (ACI-318-14 - North American regulations, NTC-RSEE - Mexican regulations, E.030 - Peruvian regulations, Eurocode 8 - European regulations). The analysis of minimum wall thickness and type of reinforcement is also presented. Finally, some of the modifications that have been made to the decree 926 of 2010 (NSR-10), and that have been introduced in the decrees 2525 of July 13, 2010, 092 of January 17, 2011, are taken into account for this study.

Degreen Work

Facultad de Fisicomecánica, Escuela de Ingeniería Civil, Director Carlos Alberto Riveros Jer

Introducción

En la actualidad, para la mayoría de edificaciones construidas en Colombia (Academia Edu, 2019), se utilizan muros estructurales de concreto armado debido a la rigidez lateral y a la reducción en los desplazamientos laterales que estos aportan. Es bien sabido que la mayoría de la población colombiana se encuentra en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta (Blue Radio, 2019), por lo cual se decidió realizar este proyecto con el objetivo principal de analizar y comprender el comportamiento de la estructura de una edificación de 5 pisos en zona sísmica alta, con un sistema de muros industrializados ante un evento sísmico, y las posibles recomendaciones de actualización a la norma sismorresistente (NSR-10 , S,f) que puedan ser implementadas, teniendo en cuenta las reformas que se han efectuado en otras normativas como la (ACI 318S-14, S,f), la norma mexicana (NTC-RSEE), la norma peruana E.030 diseño sismo resistente (E30, 2013), y el Eurocódigo 8 en los proyectos de estructuras frente a eventos sísmicos, considerando el espesor de los muros y el coeficiente de disipación de energía R (Gobierno de España, 2019).

El estudio presenta un análisis comparativo de estas normativas, utilizando en primera instancia ejemplos numéricos de muros rectangulares simples con características tomadas de una estructura convencional tipo, sabiendo (Bartolomé & Ríos, S,f) que las edificaciones construidas con estos sistemas estructurales de muros industrializados han presentado inconvenientes con los espesores, debido a que no cumplen con los mínimos estipulados en las diferentes normas en estudio. Por tal motivo, se toma una edificación de 5 niveles y se realiza

un estudio sobre el cumplimiento de las normativas, mediante la verificación de los espesores usados y la variación del coeficiente de disipación de energía R . Además, se analiza la respuesta generada sobre la edificación, aun sabiendo que las variaciones en el coeficiente no son de gran aporte ni garantizan una adecuada ductilidad a estos sistemas debido a la alta rigidez de los muros. Finalmente, con los resultados de los ejemplos numéricos se discuten las diferencias en el diseño de muros por el uso de simplificaciones prácticas avaladas por las normas realizadas por los profesionales y se proponen algunas mejoras a la normativa.

Justificación

Los sismos ocurridos el 17 de febrero del 2018 en México, y en el 2009 en las Islas Samoa, generaron grandes daños a estructuras de muros estructurales de concreto reforzado, los cuales fueron considerados hasta entonces como los sistemas estructurales sismo-resistentes idóneos en zonas de amenaza sísmica alta. Las experiencias que dejaron estos sucesos generaron grandes enseñanzas, las cuales rápidamente se añadieron en las normativas locales y en las de uso internacional como por ejemplo en el código ACI 318 del 2019 (ACI 318-19, 2019). Las versiones de la normatividad colombiana NSR-10 siempre han tenido como base una versión anterior de la Normatividad norteamericana ACI-318 (ACI, s,f). La norma sismo resistente colombiana NSR-10 (NSR-10 , S,f) en el capítulo A.6, establece que las edificaciones que se diseñan bajo estos lineamientos, logran obtener derivas de 1.43% en los modelos lineales para los sismos de diseño sin llegar al colapso.

Los espesores de los muros del sistema en estudio, varían en las características geométricas y de distribución del refuerzo, en comparación con los sistemas tradicionales. La característica principal de la cual difieren estos sistemas, son los bajos espesores, los cuales pueden llegar hasta los 70 mm y que generalmente oscilan entre los 100 mm y los 150 mm, dimensiones que son definidas por el diseñador, debido a que en la normatividad colombiana no están determinados los parámetros mínimos de espesor para este tipo de sistema de muros industrializados.

Los estudios realizados en edificaciones afectadas por terremotos (Fernandez, 2010), indican que los daños estructurales se deben a grandes cargas axiales, baja área de pared por piso, elementos de Configuración irregular y a la alta esbeltez de los muros. Para el caso colombiano, los daños observados (fisuras diagonales) muestran que los bajos espesores transversales de los muros y los puntos críticos de la sección que existen en las edificaciones, podrían facilitar la Inestabilidad fuera del plano cuando es sometida a una inversión de las cargas sísmicas (Vélez C. , y otros, 2017). Por tal motivo, se proyecta como monografía de grado compilar, estudiar, evaluar y comparar mediante un modelo numérico, la metodología de diseño utilizada en muros industrializados y su afectación con la variación de los coeficientes de disipación de energía; y las recomendaciones de las normas norteamericana, mexicana, peruana y europea con la norma colombiana, determinando las ventajas de incorporar algunos criterios, dentro de la normatividad haciendo distinción sobre los sistemas construidos en el país.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Comparar el grado de desempeño de una edificación real de 5 pisos construida empleando sistemas de muros industrializados, en zonas de amenaza sísmica alta con base en espesores mínimos de muros y el coeficiente de disipación de energía.

1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar un análisis de los aspectos normativos que aplican a edificaciones de muros delgados de concreto reforzado, teniendo como referencia la norma NSR-10.
- ✓ Determinar el nivel de desempeño de la edificación seleccionada como caso de estudio, aplicando los coeficientes de disipación de energía R utilizados en las normativas norteamericana, mexicana, peruana y europea.
- ✓ Analizar los posibles incumplimientos normativos de la edificación seleccionada como caso de estudio, teniendo como base las normas ACI-318-14 – normatividad norteamericana, NTC-RSEE – normatividad mexicana, E.030 – normatividad peruana, y Eurocódigo 8 – normativa europea.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Metodología

La metodología implementada para el desarrollo de esta monografía se describe a continuación:

- Recopilar información sobre las metodologías internacionales, que puedan ser implementadas actualmente para el diseño de edificaciones con sistemas de muros industrializados en Colombia.
- Recopilar información y recomendaciones para el análisis y diseño de muros, según las normas norteamericanas, mexicanas, peruanas y europeas.
- Analizar los coeficientes de disipación de energía implementados por las diferentes normas en estudio.
- Elaborar el modelo numérico de la edificación en estudio y el posterior análisis de resultados, siguiendo los criterios establecidos en las memorias de cálculo y en los planos de diseño, establecidos previamente por el diseñador.
- Realizar un análisis de espesores mínimos de muros según las normativas anteriormente mencionadas.
- Realizar las conclusiones y recomendaciones, de acuerdo a los resultados obtenidos.

3. Muros Industrializados de Concreto Reforzado con Bajos Espesores

3.1 Generales

El sistema de muros vaciados o muros industrializados, es una alternativa de diseño que permite industrializar la construcción de viviendas con unidades móviles (formaleta), el cual es empleado comúnmente para proyectos de edificaciones sismo-resistentes. Este sistema se basa en muros portantes tanto para solicitaciones de gravedad como sísmicas; generalmente no tiene vigas y las losas se apoyan directamente sobre los muros (Velez & Riveros , 2018). La característica que predomina es su elevada rigidez y los bajos espesores de muros, lo que permite obtener un modelo numérico adecuado ante las cargas laterales producidas por las acciones del viento y por la simplificación eventual de un sismo, restringiendo el desplazamiento lateral de la estructura. Muchos edificios de gran altura son diseñados con este sistema de muros, teniendo en cuenta, que también son muy utilizados por su rápida construcción, alcanzando un vaciado de toda una planta por día, como es el caso del sistema tipo túnel, pero considerando que la normativa colombiana NSR- 10 no especifica los valores mínimos de espesores de muros, lo cual permite que los muros industrializados se diseñen según los criterios contenidos en la misma. Los muros en el sistema industrializado, se caracterizan por el bajo espesor en comparación con el resto de las dimensiones, siendo viable conseguir grandes alturas sin que se presenten problemas de inestabilidad. La norma sismo-resistente colombiana NSR-10 en el Capítulo C.21.6.1.1 muestra lo siguiente:

C.21.6.1.1 – La dimensión menor de la sección transversal, medida en una línea que pasa a través del centroide geométrico, no debe ser menor de 300 mm. Las columnas en forma de T, C o I pueden tener una dimensión mínima de 0.25 m pero su área no puede ser menor de 0.09 m^2 .

C.21.6.1.2 – La relación entre la dimensión menor de la sección transversal y la dimensión perpendicular no debe ser menor que:

- a) 0.35 para secciones transversales cuya menor dimensión es menor o igual a 300 mm,
 - b) 0.25 para secciones transversales cuya menor dimensión es mayor de 300 mm y menor o igual a 500 mm, y
 - c) 0.20 para secciones transversales cuya menor dimensión es mayor de 500 mm
- (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Títulos A, S,f)

C.14.5.3 – Espesor mínimo de muros diseñados por el método empírico de diseño

C.14.5.3.1 – El espesor de muros de carga no debe ser menor de $1/25$ de altura o longitud del muro, la que sea menor, ni tampoco puede ser menor que 100 mm.

C.14.5.3.2 – El espesor de los muros exteriores de sótanos y cimentaciones no debe ser menor que 190 mm (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2019).

Estos espesores limitan la geometría de una columna para una relación entre la menor dimensión de la sección transversal y la correspondiente a la dirección perpendicular la cual no puede ser menor de 0.35; si es menor se deja de considerar como columna y se considera como muro (NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, S,f), ya que un

muro de concreto reforzado lleva como acero de refuerzo barras horizontales y verticales con unos recubrimientos mínimos definidos por la norma. Los muros delgados, en el contexto nacional llevan por lo general como refuerzo una malla electrosoldada dúctil, la cual cumple las funciones de refuerzo vertical y horizontal; sin embargo, estos criterios de refuerzo no están definidos en la norma para este tipo de muros, ni sus dimensiones mínimas. Los muros delgados tienen el comportamiento de una viga vertical empotrada en voladizo (cantilever) con una deformación sujeta por flexión (Briceño & Carreras , 2010). Estos modelos solamente son permitidos en sistemas que tienen en cuenta una disposición simétrica de los muros en planta, de manera que se logren impedir los efectos torsionales originados por los cambios en los centros de masa y los centros de rigidez, y a la vez se evite una baja presencia de vanos o aberturas que intervengan en la respuesta estructural de la edificación (Briceño & Carreras , 2013), figura 1. En caso de que existan irregularidades en la distribución de muros en planta, en sus simetrías y sin tener en cuenta las aberturas de los muros (vanos, ventanas y puertas), se pueden llegar a presentar torsiones originadas por los cambios en los centros de masa y en los centros de rigidez, lo que conlleva a que el muro no posea un comportamiento de deformación por flexión, sino que también, pueda presentar rotaciones, generando deformaciones fuera del plano, evitando que tenga un comportamiento como viga empotrada y presentando fallas por cortante. Debido a que no se cuenta con un criterio de diseño en la norma sismo resistente colombiana (NSR-10 , S,f) que diferencie los muros de concreto reforzado con los muros delgados y de ductilidad limitada, estos últimos se diseñan como la norma lo indica para un muro de concreto reforzado. Al tratarse de elementos en concreto reforzado, se debe realizar una correcta disposición del acero de refuerzo en toda la amplitud

de los muros, obteniendo el comportamiento esperado, en particular, cuando se quiere diseñar que el acero irumpa en el rango inelástico en franjas específicas, con la intención de disipar energía. Dado que se trata de muros delgados y de ductilidad limitada, estos no cuentan con acero de refuerzo sino con una malla electrosoldada y, además el muro falla de forma frágil, debido a que la malla no irrumpe en el rango inelástico por su baja ductilidad (Briceño & Carerras , 2013).

El armado se realiza en dos direcciones, ubicando refuerzo horizontal y vertical, buscando resistir las fuerzas cortantes en ambas direcciones ortogonales al plano del muro, así como las solicitudes por momento flector y fuerza axial. Como acero de refuerzo, es recomendable utilizar barras corrugadas (figura 2) y no mallas electrosoldadas, ya que estas últimas cuentan con baja ductilidad. El refuerzo en sentido diagonal es necesario en algunos casos, como en dinteles con solicitudes a cortantes altos (Briceño & Carerras , 2013).



Figura 1 Edificio de sistema de muros vaciados



figura 2 performance, analysis and design of flexural concrete Wall

Los sistemas de muros de concreto reforzado tienen un comportamiento diferente a los muros delgados y de ductilidad limitada, ya que varían según sus características, pudiéndose diseñar para que el acero a flexión (barras corrugadas) trabaje en el rango elástico para las solicitudes máximas o en cambio, para que dicho acero alcance la tensión de cedencia e irrumpa en el rango ineslastico (Briceño & Carerras , 2013). En Colombia, para la mayoría de los casos presentados en edificaciones construidas con sistemas de muros industrializados no se han utilizado barras de acero corrugadas, sino malla electrosoldada, afectando el adecuado comportamiento del muro (Blasco, 2004).

3.1.1 Tipificación según la geometría

3.1.1.1 Forma de sección en elevación: La tipificación de los muros industrializados actuales se realiza teniendo en cuenta la geometría, la relación de aspecto, y la variabilidad de

las alturas o las longitudes en los diferentes niveles de la edificación. Sin embargo, se debe aclarar que los criterios de diseño utilizados para este tipo de muros no es el indicado, ya que se utilizan criterios para muros de concreto reforzado, establecidos por la normativa colombiana, debido a la falta de regulación para muros delgados y de ductilidad limitada.

Según Fratelli, M. (1999), los muros se pueden clasificar en los siguientes 3 tipos, de acuerdo a la relación de aspecto:

- ✓ **Muros bajos:** Cuando la relación de altura vs longitud $\frac{H}{L} < 2$
- ✓ **Muros Intermedios:** Cuando la relación de altura vs longitud $2 \leq \frac{H}{L} < 5$
- ✓ **Muros altos:** Cuando la relación de altura vs longitud $\frac{H}{L} \geq 5$

La mayoría de los muros estructurales son vistos como elementos viga-columna cuyas fuerzas laterales son transferidas por los diafragmas de piso como fuerzas puntuales. Según su relación de aspecto $\frac{Altura}{Longitud}$ o $\frac{H_w}{L_w}$, se clasifican como muros esbeltos, a aquellos cuya relación sea mayor o igual a 2 y como muros robustos a aquellos con valores inferiores a 2. Se debe tener en cuenta, que a medida que se reduce la proporción de aspecto, aumentan las probabilidades de fallas por cortante en la estructura. En cambio, cuando esta proporción es alta, el comportamiento es como el de una viga en voladizo, donde las solicitaciones predominantes serían las flexiones (Briceño & Carerras , 2013).

3.1.1.2 Forma de sección en Transversal. Los muros también se pueden clasificar según la forma de su sección transversal. En la Figura 3, se muestran las diferentes secciones

transversales que pueden adoptar los muros en concreto reforzado. A menudo presentan elementos extremos, (Figura 3b, 3c, 3d) los cuales permiten un anclaje adecuado de las vigas para ubicar refuerzo a flexión, estabilizar el muro en sentido débil y suministrar confinamientos. Los espesores varían según la demanda de acero y los requisitos normativos (Alcocer, 1995).

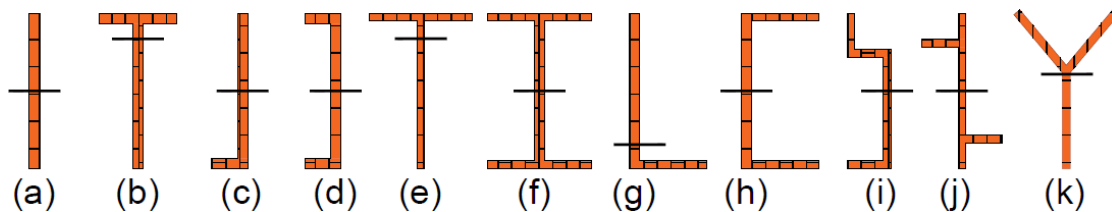


Figura 3 Secciones transversales de muros estructurales (Alcocer, 1995)

3.1.1.3 Forma en Comportamiento: Teniendo como criterio la respuesta de los muros estructurales, estos se pueden clasificar de la Siguiete Forma (Alcocer, 1995):

- **Muros de cortante:** cuyas deflexiones y resistencia son controladas por el cortante.
- **Muro de flexión:** cuyas deflexiones y resistencia son controladas por la flexión.
- **Muros dúctiles:** que poseen una buena disipación de energía ante cargas cíclicas reversibles.

Si en los diseños se obtienen resultados elásticos, cualquier muro de los indicados anteriormente es ideal, pero, si se prevé un comportamiento en el rango inelástico como ocurre ante un evento sísmico, siendo los más desfavorables los muros de cortante. Por lo tanto, se recomiendan los muros dúctiles, debido a que los muros de bajo espesor tienen una ductilidad limitada y por consiguiente una baja carga gravitacional (relación de carga axial menor al 10%), además, estos muros tienen una malla electrosoldada de acero no dúctil como refuerzo longitudinal y transversal y una relación de refuerzo longitudinal predominantemente baja (Blandon, Arteta, Bonett, Carrillo, & Beyer)

3.1.1.4 Modos de Falla y Criterios de Diseño - Muros esbeltos. Debido a que los muros estructurales son elementos que por lo general resisten cargas verticales y además son los encargados de resistir las cargas laterales, es preciso que ante sucesos de sollicitación máxima, estos se comporten de forma dúctil; dicha conducta depende especialmente del correcto diseño de las zonas de articulación plástica, por lo que con base en estas zonas, se debe efectuar la revisión de resistencia, deformaciones inelásticas y capacidad de deformación de toda la estructura. Figura 4.

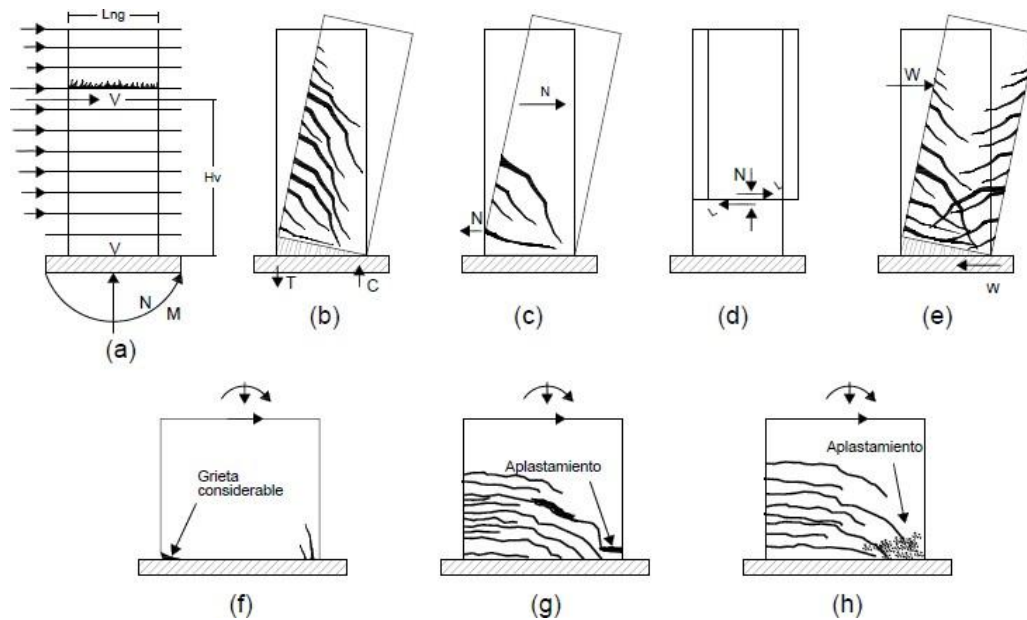


Figura 4 Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado muros estructurales (Alcocer, 1995)

Se deben considerar los modos de falla, como es la plastificación del acero a flexión (Figura: 4 b y e), ya que esto garantiza el desempeño dúctil, por lo tanto, se debe evitar que el acero tenga una falla por rotura a flexión (Figura: 4 f), a tensión diagonal (Figura: 4 c y g) o a compresión diagonal causadas por cortante (Figura: 4 h), además del cuidado especial que se debe tener con las fallas por inestabilidad del alma o del refuerzo principal a compresión (pandeo del muro y su refuerzo principal), deslizamiento por cortante en las juntas (Figura: 4d) y fallas por cortante o adherencia a lo largo de las uniones de barras o anclajes.

Teniendo un confinamiento apropiado, la resistencia del concreto a la compresión aumenta, y por lo tanto mejora el desempeño dúctil del muro. En caso de no existir el confinamiento, el muro tiende a fallar rápidamente por aplastamiento del concreto, debido a que la resistencia del mismo no puede equilibrar los esfuerzos de tensión del acero. Además, el

muro también puede fallar por inestabilidad lateral, incluso cuando posee confinamiento en sus extremos, por lo que se recomienda incluir patines en los extremos del muro (Alcocer, 1995), dado que en los muros de ductilidad limitada no se puede variar su espesor, se deben incluir barras de refuerzo en los extremos del muro.

➤ **Muros robustos**

Son aquellos que poseen una relación de aspecto $\frac{H_w}{L_w} < 2$; según su comportamiento también se pueden clasificar en (Alcocer, 1995):

- ❖ Muros elásticos: debido a la alta resistencia que poseen estos elementos, es normal que ante fuertes sismos se mantengan dentro de los rangos elásticos.
- ❖ Muros que pueden cabecear: Son muros capaces de resistir altas cargas laterales, pero que su capacidad de resistir cargas verticales es muy baja. Debido a estas circunstancias, su capacidad se ve limitada a su resistencia al volteo, por lo tanto, si la cimentación fue diseñada para estas condiciones de resistencia a fuerzas verticales y horizontales, el muro permanece en el rango elástico (Alcocer, 1995).
- ❖ Muros dúctiles: frecuentemente el diseño de las cimentaciones no se puede realizar para que el muro permanezca en el rango elástico, por lo que se hace necesario realizar diseños en elementos que entren en el rango inelástico.

Ya que la resistencia de los muros industrializados a la flexión es tan alta, es normal que fallen a cortante y por lo tanto se deben considerar como elementos de ductilidad restringida (Alcocer, 1995).

A continuación, se pueden observar de manera gráfica las formas de falla más comunes que se presentan en muros robustos (Velez & Riveros , 2018).

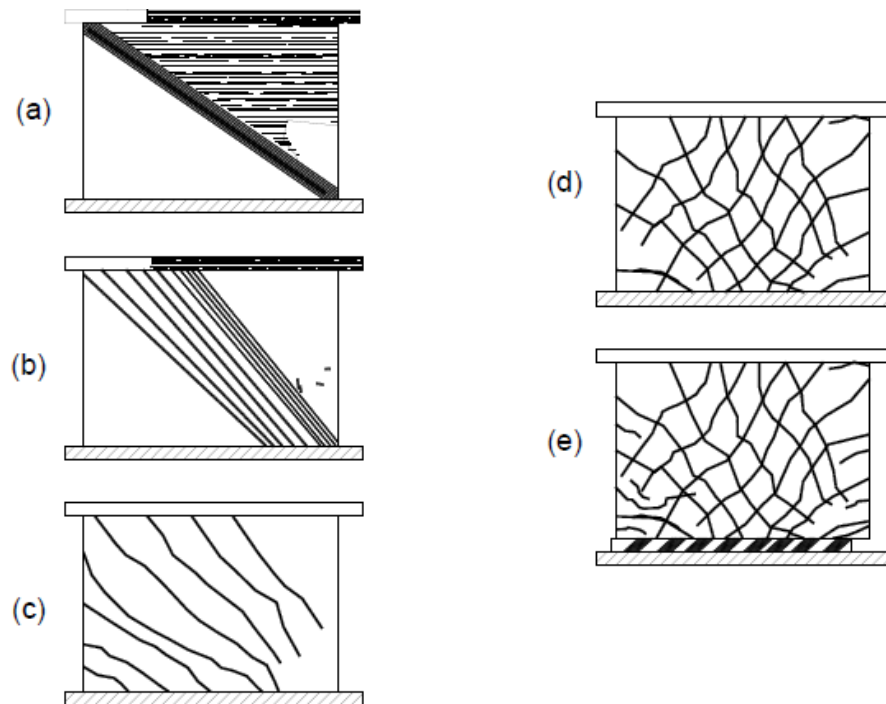


Figura 5 Modos de falla por corte en muros robustos (Briceño & Carerras , 2013)

a) La falla por tensión diagonal se ocasiona cuando el refuerzo horizontal es deficiente para impedir el progreso de la grieta.

- b)** La capacidad a tensión diagonal depende de la forma en que se apliquen las cargas, de modo en que, si se logran distribuir las fuerzas a lo largo del muro, el agrietamiento por la tensión diagonal no conducirá a la falla.
- c)** Para el evento en que el corte sea elevado y el muro se encuentre reforzado de manera correcta (refuerzo horizontal), el concreto puede presentar aplastamiento por compresión diagonal.
- d)** En los muros con elementos extremos y una alta resistencia a la flexión, constantemente el aplastamiento se extiende sobre toda la longitud del muro.
- e)** Las fallas por compresión diagonal ocasionan una pérdida abrupta en la capacidad del elemento, por lo tanto, cada vez que se diseñen estos elementos deben orientarse a evitar estas fallas.

Cabe resaltar la importancia de utilizar muros dúctiles para diseños sismo-resistentes, evitando los muros controlados por cortante, debido a su baja posibilidad de disipar energía (Briceño & Carerras , 2013).

Los modelos con cargas histeréticas, consisten en cargar y descargar un espécimen de forma repetitiva. De estos modelos, se pueden obtener curvas mucho más estables para muros dúctiles que para muros dominados por cortante, estableciendo la efectividad de los primeros

para disipar energía continuamente a lo largo de los ciclos (Briceño & Carerras , 2013). Esta comparación se presenta en la Figura 6.

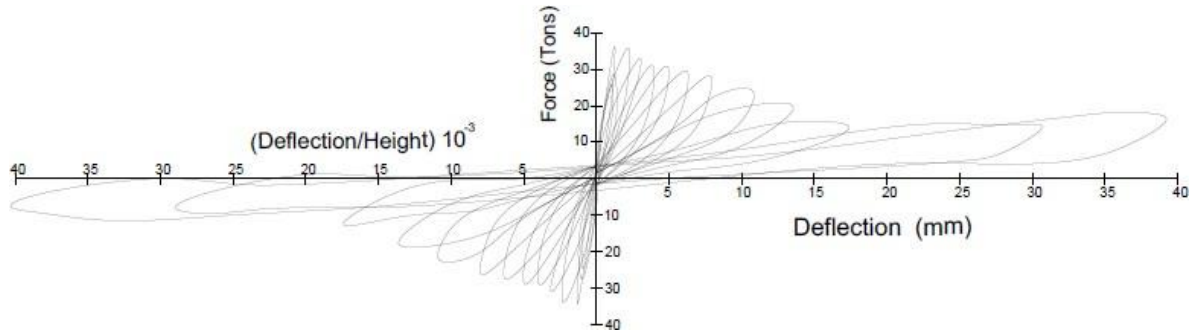


Figura 6 Respuesta histerética de un muro controlado por cortante (Briceño & Carerras , 2013)

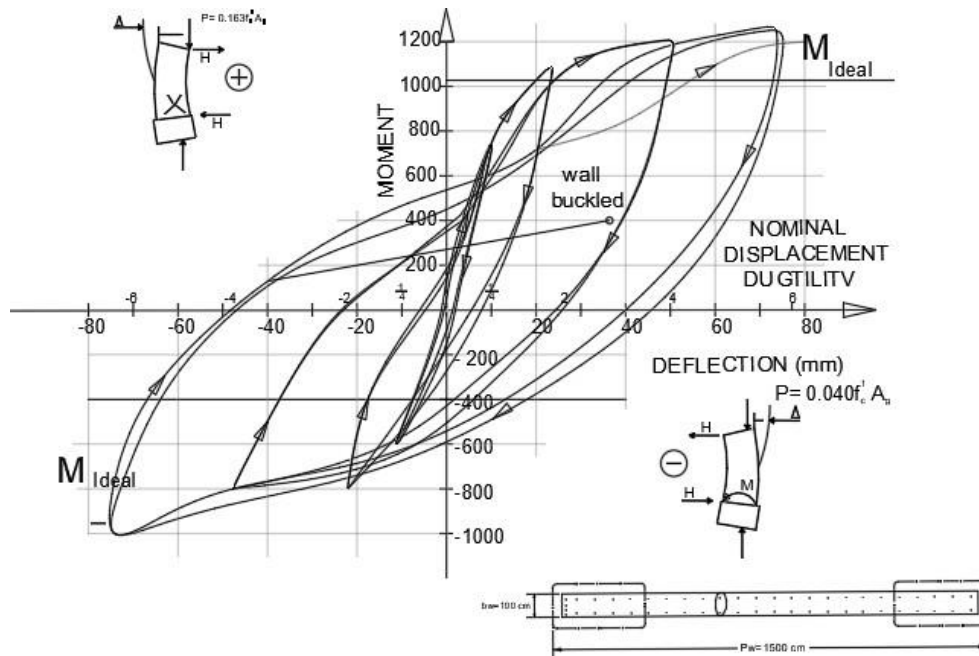


Figura 7 Respuesta histerética de un muro dúctil (Briceño & Carerras , 2013)

Los muros dúctiles son diseñados para que la resistencia y las deformaciones de la estructura sean regidos por la fluencia del acero a flexión, localizándose en puntos especialmente detallados para la ocurrencia de rotulas plásticas (Briceño & Carerras , 2013).

El detallado y la correcta distribución del acero de refuerzo a lo largo de todo el muro también influyen en su desempeño. Según (Alcocer, 1995), la concentración de refuerzo en sus extremos los hace más eficientes que aquellos que lo tienen distribuido, además que es más resistente y dúctil, como se demuestra en la Figura 8.

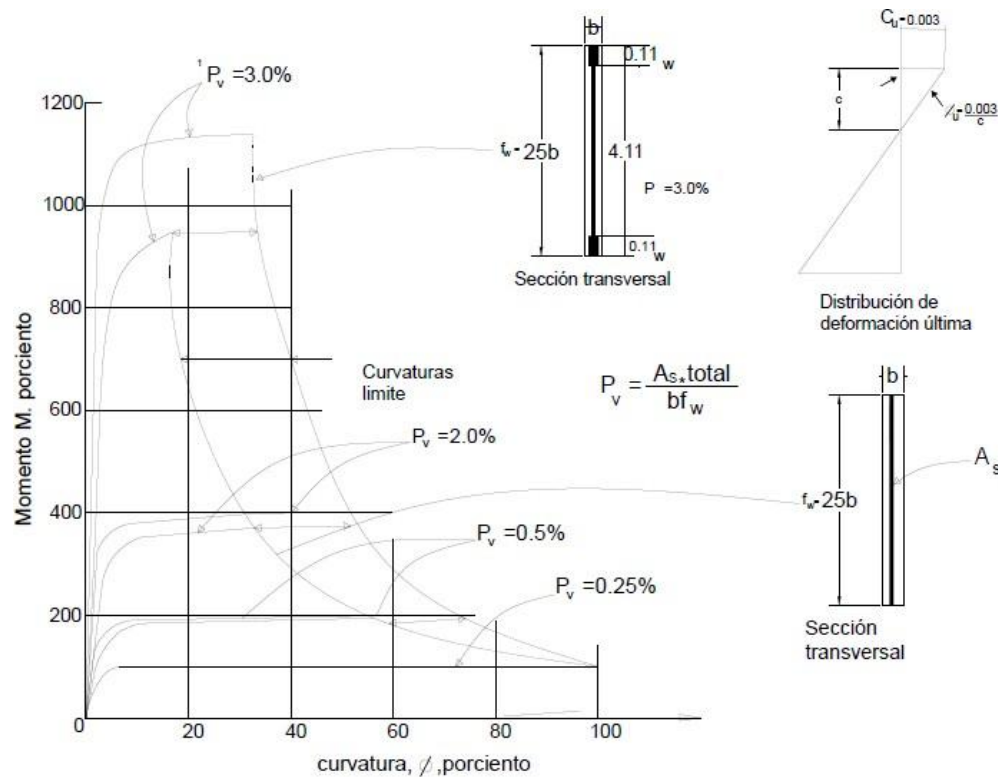


Figura 8 Efecto de distribución del refuerzo y de la cuantía en la resistencia a flexión y en la curvatura (Alcocer, 1995).

La ductilidad se puede ver afectada si el acero irrumpe en el rango de endurecimiento de deformación, por lo cual, se hace necesario realizar un adecuado detallamiento del confinamiento, y de esta manera generar un aumento en la capacidad de deformación útil del concreto y consiguiendo un retraso en el pandeo del acero por flexión (Briceño & Carreras, 2013). Una de las mayores desventajas que tiene este procedimiento, son los bajos espesores y el uso de malla electrosoldada como acero de refuerzo, por los problemas que se presentan

al momento del evento sísmico, dado que no cuenta con la ductilidad que aporta una barra corrugada. Por estas razones, se recomienda realizar una distribución uniforme del acero de refuerzo (barras corrugadas) en la totalidad de la longitud del muro y no el uso de malla electrosoldada, logrando un aumento en la resistencia al deslizamiento del mismo (Arthur, 2001) citando a Rodríguez, 2011 y su ductilidad. Figura 9 (Norma venezolana 1753 , 2006).

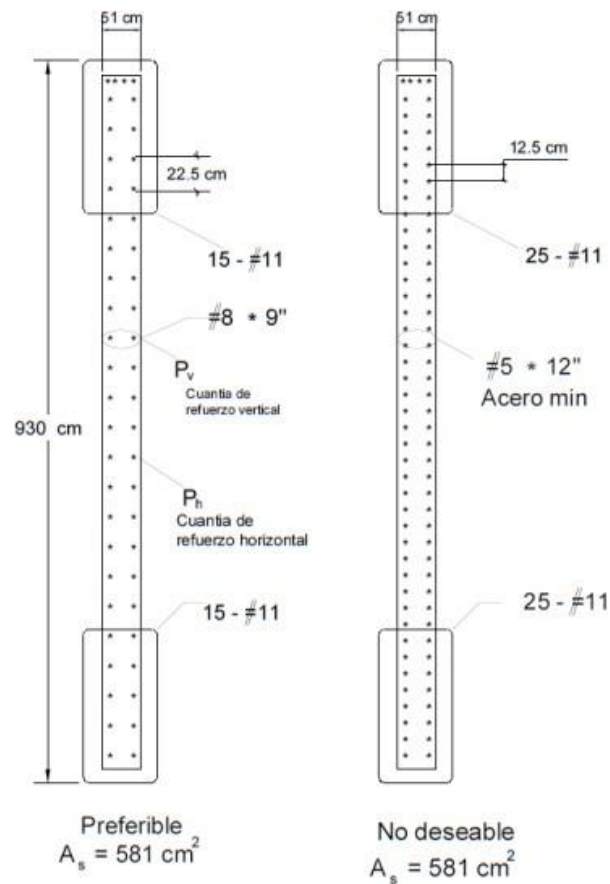


Figura 9 Distribución del acero de refuerzo longitudinal en la sección transversal de un muro (Norma venezolana 1753 , 2006).

El sistema de muros en concreto reforzado en comparación con el sistema de pórticos en edificaciones de mediana y gran altura, presenta un mejor comportamiento sismo-resistente, debido a que sus particularidades le brindan a la edificación mayor rigidez, permitiendo disminuir los desplazamientos laterales al ser sometido a fuerzas sísmicas.

Además, este sistema cuenta con una gran capacidad de deformación, que permite disipar energía y resistir sismos intensos, y como ya se ha mencionado, el comportamiento de un muro se representa como una viga en voladizo en flexión. Por el contrario, los pórticos que son sometidos a cargas laterales sufren deformaciones predominantes por el cortante (Fratelli, 1999).

Hoy en día para la construcción de edificaciones de concreto reforzado, es normal la Combinación de los dos sistemas, dando origen al sistema dual pórtico – muro. Según (Lobo, W. 2011), en edificaciones superiores a los 30 pisos, la aplicación de los muros es dominante al ser combinados con pórticos de vigas acarteladas, en un sistema dual. El perfecto funcionamiento de estos dos sistemas dependerá de sus rigideces, lo que indica que la mejor forma es mantener una relación entre las dos constantes en la altura, y de esta manera garantizar un adecuado comportamiento estructural, sin que se presenten efectos indebidos. Al combinar estos sistemas, se demuestra mayor eficiencia al momento de predecir el comportamiento global de la estructura, en comparación con los sistemas usados en Colombia, que son edificaciones con sistemas aporticados y muros en mampostería. Según (Urich, Schmitz, Schultz, Lewsey, & O'Malley, 2011), para mejorar la compatibilidad de las deformaciones entre la armadura estructural y los muros de mampostería, se evidencia que el mejor sistema es el que tiene como base los muros, debido a que los hace más eficientes tal como se pudo evidenciar en el desempeño de las edificaciones de Chile durante el terremoto del año 2010.

En la Figura 10 se observa que cuando una estructura está sometida a cargas laterales, los muros y los pórticos se mueven en el sentido del desplazamiento en los pisos inferiores, pero se oponen al movimiento en los superiores. En los sistemas duales, dada la compatibilidad de desplazamientos que es obligada por las losas de entrepiso, el pórtico y los muros distribuyen la resistencia en los pisos inferiores, pero se oponen en niveles superiores (Alcocer, 1995).

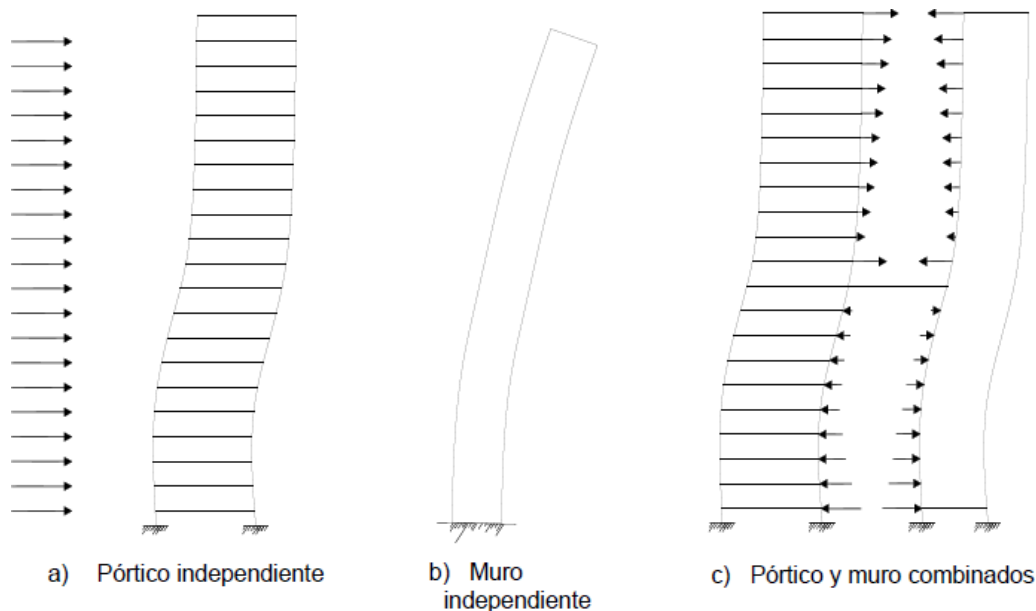


Figura 10 Deformación ante cargas laterales de un pórtico, un muro y un sistema dual (Alcocer, 1995)

En los sistemas de muros industrializados, se deben tener en cuenta varias recomendaciones a la hora de realizar un diseño y de esta manera tener control en todos los efectos actuantes sobre la edificación. Estas recomendaciones son: 1) Una adecuada distribución de muros en planta, las variaciones geométricas en la altura y la presencia o no de vanos que puedan llegar a afectar su desempeño. 2) Una inadecuada distribución de muros en el espacio de la planta puede ocasionar graves consecuencias y alterar el uso de la edificación.

3) Lograr una excelente distribución y ubicación de muros de forma simétrica en planta, evitará los efectos torsionales, los cuales generan daños en elementos no estructurales, fisuración prematura del concreto y hasta el inaceptable peligro de destrucción bajo fuertes solicitaciones. En la Figura 11 se puede apreciar una distribución de muros de forma simétrica y asimétrica (Briceño & Carerras , 2013).

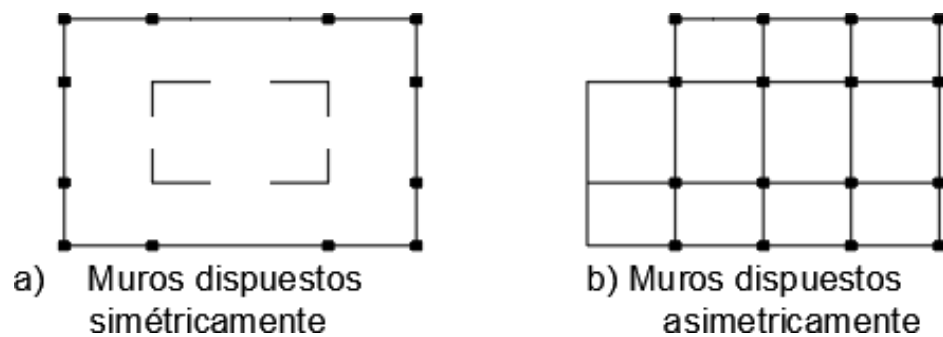


Figura 11 Clasificación de muros, según su distribución en planta (Briceño & Carerras , 2013)

Debido a las grandes solicitaciones que se presentan en los primeros niveles (base del muro), se hace innecesario mantener el mismo espesor o la misma longitud en los niveles superiores, a este tipo de muros se les conoce como muros discontinuos (Figura 12). Según (Fratelli, 1999), estos cambios generan variaciones en la distribución de esfuerzos y cargas, dando lugar a complejas redistribuciones de tensiones.

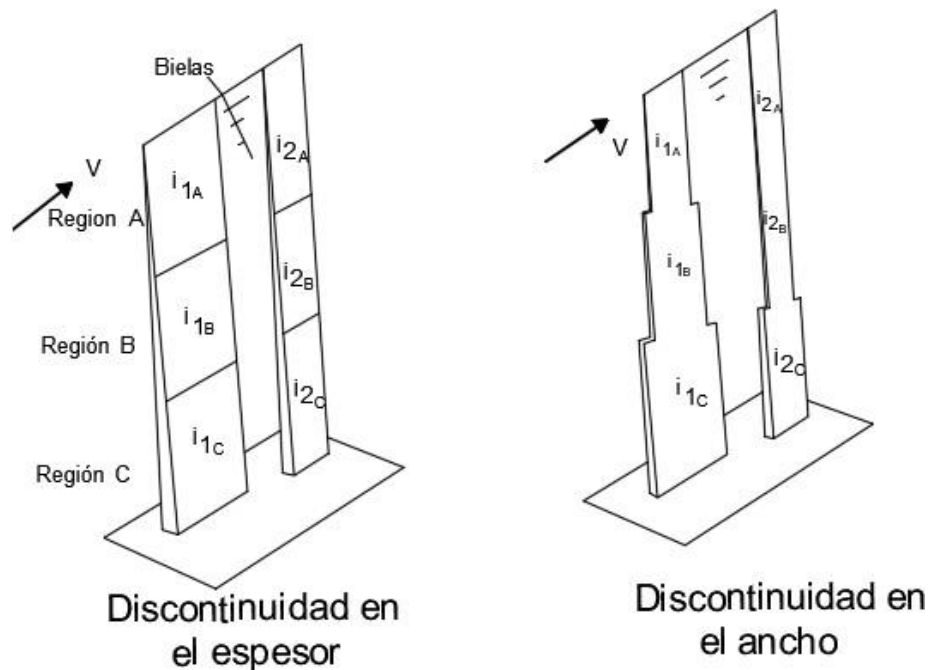


Figura 12 Muros discontinuos (Briceño & Carerras , 2013)

También existe el caso de los muros que contienen vanos, lo que implica mayor cuidado, ya que, si los muros son esbeltos, pueden afectar la resistencia y la rigidez de los mismos. Según (Alcocer, 1995), si las aberturas se sitúan de modo alterno en altura, se recomienda la utilización del refuerzo diagonal, y de esta manera ayudar en la formación de campos diagonales a compresión y a tracción una vez que el muro haya fallado por agrietamiento de forma diagonal. Una forma de representar estas distribuciones de tensión se puede ver en la Figura 13; si no hay presencia de vanos se caracteriza como un muro macizo.

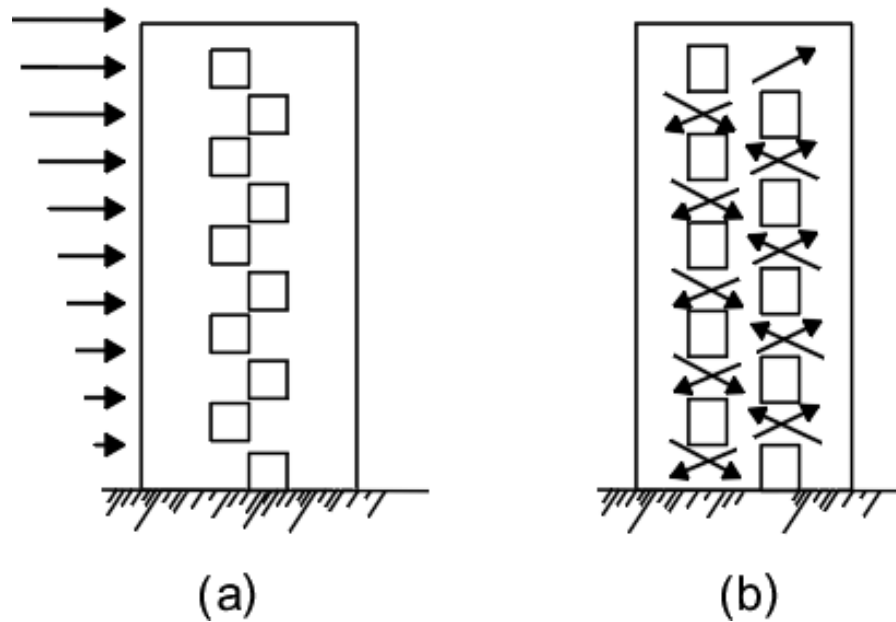


Figura 13 Resistencia al corte, afectada por aberturas en muros (Briceño & Carerras , 2013)

Si la disposición de las aberturas es de manera uniforme en la altura de la edificación, se puede obtener un sistema de muros acoplados, Figura 14 a) Continuidad en la transmisión de fuerzas. b) Muro fuerte – viga débil posible comportamiento dúctil. c) Muro fuerte – viga débil posible comportamiento dúctil. d) Muros débil – viga fuerte, comportamiento elástico de vigas los muros fallaran antes que las vigas de forma frágil. Los cuales poseen buenas características sismo-resistentes. La forma en que los muros estructurales disipan la energía, se debe a la plastificación del acero a flexión. Los muros acoplados tienen la facultad de disipar energía de forma significativa a través de la fluencia de las vigas acopladas (Alcocer, 1995).

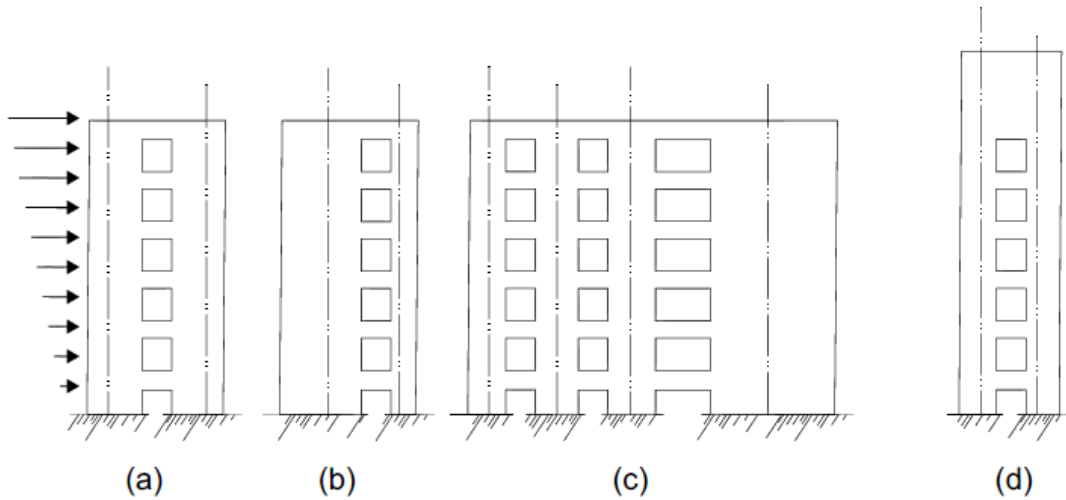


Figura 14 Tipos de muros acoplados (Briceño & Carerras , 2013)

4. Normativas en Estudio

A continuación, se relacionan las normas nacionales e internacionales en estudio, las cuales se seleccionaron de acuerdo a los criterios de diseño y construcción de muros, con características propias de cada país. Estos países han ido mejorando los sistemas constructivos, dando avances a las normativas aplicadas, siempre en pro de la conservación de la vida humana. Se hace necesario realizar un estudio a estas normativas, en donde se analicen las diferentes características implementadas, con el fin de buscar mejoras que reduzcan los daños causados por los sismos que se puedan presentar cerca, iguales o superiores al sismo de diseño. Esta metodología busca mejorar los criterios con que se diseñan los muros en la actualidad, teniendo como objetivos los espesores mínimos requeridos para muros delgados, los factores de reducción de fuerzas sísmicas, y la utilización de mallas electrosoldadas como refuerzo para muros delgados. Adicional, se observa que los edificios de muros delgados carecen de

elementos de borde, los cuales ayudan a dar soporte y estabilidad, evitando pandeos fuera del plano, desplazamientos limitados, y reduciendo las fuerzas cortantes, como es el arquetipo de edificaciones colombianas de pared delgada.

4.1 Norma Norteamericana ACI 318-14: Requisitos de reglamento para concreto estructural

Espesor de muro: En la ecuación 1 se establece que la dimensión mínima de un muro debe

Ser igual a:

$$b \geq \frac{h_u}{16} \quad [1]$$

Dónde: b corresponde al espesor del muro y h_u corresponde a la altura del muro para los muros diseñados por medio de la ecuación 2:

$$\frac{h_w}{l_w} \geq 2 \quad y \quad \frac{c}{l_w} \geq \frac{3}{8} \quad [2]$$

Donde h_w corresponde a la altura total del muro, l_w corresponde a la longitud total del muro, c distancia medida desde la fibra extrema a compresión al eje neutro. El espesor mínimo de los miembros de borde será de 300 mm.

Doble capa de refuerzo en muros: (Vásquez, 2013), manifiesta que en las zonas donde se presente pandeo del refuerzo longitudinal lateral, no se debe permitir una sola capa de refuerzo en el alma, por lo tanto, la (ACI 318S-14, S,f), exige el uso de doble capa de refuerzo

cuando los muros sean esbeltos, y de esta manera ayude a resistir las exigencias por fuerzas de corte.

Segmentos verticales “Wall Piers”: En el comentario R18.10.1 de la norma (ACI 318SUS-14, S,f), se define el alcance del capítulo referido, el cual fue expandido con la incorporación de las nuevas especificaciones para los llamados machones, las cuales se muestran a continuación:

Los requerimientos de diseño para los segmentos de muros verticales dependerán de la relación de aspecto en el plano del muro (h_w/L_w) y la relación de aspecto de la sección transversal (L_w/b_w) del mismo, y generalmente sigue las descripciones en la tabla 18.10.1. Las relaciones de aspecto que limitan los segmentos de muros están basadas en el juicio del ingeniero. Se pretende que la cedencia del refuerzo vertical debido a la flexión en el segmento de muro, deba limitar la demanda por corte en él (ACI 318S-14, S,f).

4.2 Normas técnicas complementarias para el diseño por sismo y construcción para estructuras en concreto (NTC-RSEE)

Para realizar el diseño de todo tipo de elementos como lo son; muros, columnas o contravientos los cuales contribuyen en más del 35% a la resistencia de la fuerza cortante, momento torsionante o momento de volteo de un entrepiso dado, se deben acoger factores de resistencia 20% inferiores a los que corresponden, de acuerdo con las normas correspondientes. Los muros que contribuyen a resistir fuerzas laterales se deben ligar adecuadamente a los marcos estructurales o a castillos y dadas en todo el primer muro; su rigidez se toma en cuenta

en el análisis sísmico y se verifica su resistencia de acuerdo con las normas correspondientes. Se debe verificar que las vigas, losas y columnas resistan las fuerzas cortantes, el momento flexionante, las fuerzas axiales y en su caso, las torsiones que induzcan los muros en ellos. Así mismo, se debe verificar que las uniones entre los elementos estructurales resistan dichas acciones y que la estructura como la cimentación resistan los momentos flexionantes, fuerzas cortantes y axiales, momentos torsionantes de entrepiso y momentos de volteo inducido por sismo, combinados con lo que corresponde a otras solicitaciones y afectados por el factor de carga correspondiente, según las normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.

➤ **4.2.1 Factor de reducción.** Para el cálculo de las fuerzas sísmicas para análisis estático y de las obtenidas por el análisis dinámico modal, se debe emplear un factor de reducción Q' , el cual se calcula por medio de la ecuación 3:

$$Q' = Q \quad \text{Si se desconoce } T, \text{ o si } T \geq T_a \quad [3]$$

$$Q' = 1 + \frac{T}{T_a}(Q - 1) \quad \text{Si } T < T_a$$

T , es igual al periodo fundamental de vibración de la estructura cuando se utilice el método estático, e igual al periodo natural de vibración cuando se utilice el análisis dinámico modal; T_a , es un periodo característico del espectro de diseño; Q , es el factor de comportamiento sísmico.

➤ **4.2.2 Factor de comportamiento sísmico.** Para el factor de comportamiento sísmico Q , se deben adoptar los valores especificados en alguna de las siguientes secciones, según se cumplan los requisitos en ella indicados.

4.2.2.1 Requisitos para $Q = 4$

Se usa $Q = 4$ cuando se cumplan los siguientes requisitos.

- a) La resistencia en todos los entrepisos es suministrada exclusivamente por marcos no contraventeados de acero, concreto reforzado, o compuestos de los materiales, o bien por marcos contraventeados o con muros de concreto reforzado o de una placa de acero o compuesto de los dos materiales, en los que, en cada entrepiso, los muros son capaces de resistir, sin contar muros ni contravientos, cuando menos 50% de la fuerza sísmica actuante.
- b) Si hay muros de mampostería ligados a la estructura, esta se debe considerar en el análisis, pero su contribución a la resistencia ante fuerzas laterales solo se tiene en cuenta si son de piezas macizas y los muros, sean o no contraventeados y los muros de concreto reforzado, de placa de acero o compuesto de los dos materiales, son capaces de resistir al menos 80% de las fuerzas laterales totales sin la contribución de los muros de mampostería.
- c) El mínimo cociente de la capacidad resistente de un entrepiso ante la acción de diseño no difiere de más del 35% del promedio de dichos cocientes para todos los entrepisos. Para verificar el cumplimiento de este requisito, se calcula la capacidad resistente de cada

entrepiso, teniendo en cuenta todos los elementos que puedan contribuir a la resistencia; el ultimo entrepiso queda excluido de este requisito.

d) Los marcos y muros de concreto reforzado cumplen los requisitos que fijan las normas correspondientes para marcos y muros dúctiles.

e) Los marcos rígidos de acero satisfacen los requisitos para marcos con ductilidad alta que fijan las normas correspondientes o están provistas de contraventeo excéntrico.

4.2.2.2 Requisito para $Q = 3$

Se usa $Q=3$ cuando se satisfacen las condiciones (b) y (d) o (e), y en cualquier entrepiso dejan de satisfacerse las condiciones (a) o (c) del numeral **4.2.2.1**, pero la resistencia en todos los entrepisos es suministrada por columnas de acero o de concreto reforzado con losas planas, por marcos rígidos de acero, por marcos de concreto reforzado, por muros de concreto o placa de acero o compuestos de los materiales, por combinaciones de estos y marcos o por diafragmas de madera. Las estructuras con losas planas y de madera deben, además satisfacer los requisitos que sobre el particular marcan las normas correspondientes. Los marcos rígidos de acero satisfacen los requisitos para ductilidad alta o están provistos de contraventeo concéntrico dúctil, de acuerdo con las normas correspondientes.

4.2.2.3 Requisito para $Q = 2$

Se usa $Q=2$ cuando la resistencia a las fuerzas laterales es suministrada por losas planas con columnas de acero o de concreto reforzado, por marcos de acero con ductilidad reducida o

provistos de contraventeo con ductilidad normal, o de concreto reforzado que no cumplan con los requisitos para ser considerados dúctiles, o muros de concreto reforzado, de placa de acero o compuestos de acero y concreto, que no cumplan en algún entrepiso lo especificado por las secciones 4.2.2.1 y 4.2.2.2, o por muros de mampostería de piezas macizas confinadas por castillos, dalas, columnas o trabes de concreto reforzado o de acero que satisfacen los requisitos de las normas correspondientes.

También se usa $Q=2$ cuando la resistencia es suministrada por elementos de concreto reforzado o presforzado, con las excepciones que sobre el particular marcan las normas correspondientes, o cuando se trate de algunas estructuras de acero o de madera con las características que se indican en las normas respectivas.

4.2.2.4 Requisitos para $Q = 1.5$

Se usa $Q=1.5$ cuando la resistencia a fuerzas laterales es suministrada en todos los entrepisos por muros de mampostería de piezas huecas, confinados o con refuerzo interior, que satisfacen los requisitos de las normas correspondientes, o por combinaciones de dichos muros con elementos como los descritos para los casos de las secciones 4.2.2.2 y 4.2.2.3, o por marcos y armaduras de madera, o por algunas estructuras de acero que se indican en las normas.

4.2.2.5 Requisitos para $Q = 1$

Se usa $Q=1$ en estructuras cuya resistencia a fuerzas laterales es suministrada al menos parcialmente por elementos o materiales diferentes de los arriba especificados, a menos, que se

haga un estudio que demuestre a satisfacción de la administración, que se puede emplear un valor más alto que el que aquí se especifica; también en algunas estructuras de acero que se indican en las normas correspondientes.

En todos los casos se usa para toda la estructura en la dirección de análisis, el valor mínimo de Q , que corresponde a los diversos entrepisos de la estructura en dicha dirección. El factor Q puede diferir en las dos direcciones ortogonales en que se analiza la estructura, según sean las propiedades de esta en dichas direcciones.

4.2.3 Dimensionamiento de muros de ductilidad alta ($Q = 4$)

4.2.3.1 Muros sujetos solamente a cargas verticales axiales o excéntricas. Estos muros se deben dimensionar por flexo-compresión como si fueran columnas, teniendo en cuenta las disposiciones complementarias:

✓ Ancho efectivo ante cargas concentradas: Se toma como ancho efectivo una longitud igual a la de contacto más cuatro veces el espesor del muro, pero no mayor que la distancia centro a centro entre cargas.

✓ Refuerzo mínimo: Si la resultante de la carga vertical de diseño queda dentro del tercio medio del espesor del muro y, además su magnitud no excede de $0.3 f'c A_g$, el esfuerzo mínimo vertical del muro se debe calcular según la ecuación 4:

$$a_{s1} = \frac{660x_1}{f_y(x_1+1000)} \quad [4]$$

a_{s1} : Área transversal del refuerzo colocado en la dirección que se considera, por unidad de ancho de la pieza, mm^2/mm . El ancho mencionado se mide perpendicularmente a dicha dirección y a x_1

X_1 : dimensión mínima del miembro medida perpendicularmente al refuerzo, mm.

Si x_1 no excede de 150 mm, el refuerzo puede colocarse en una sola capa. Si x_1 es mayor que 150 mm, el refuerzo se coloca en dos capas próximas a las caras del elemento. En elementos estructurales expuestos directamente a la intemperie o en contacto con el terreno, el refuerzo no debe ser menor de $1.5 a_{s1}$.

Por sencillez, en vez de emplear la formula anterior puede suministrarse un refuerzo mínimo con cuantía igual a 0.002 en elementos estructurales protegidos de la intemperie, y 0.003 en los expuestos a ella, o que estén en contacto con el terreno.

La separación del refuerzo por cambios volumétricos no debe ser mayor de 500 mm ni de $3.5 x_1$, sin que sea necesario restringirlo contra el pandeo; si no se cumple alguna de las condiciones anteriores, el refuerzo vertical mínimo de la sección no debe ser menor que $0.01 A_g$ ni mayor que $0.06 A_g$; y habrá que restringirlo contra el pandeo mediante grapas.

4.2.3.2 Muros sujetos a fuerzas horizontales en su plano. Aplica a muros cuya función sea resistir fuerzas horizontales en su plano, con cargas verticales menores que $0.3 f'cAg$, con relación $\frac{L}{t} < 70$, (donde L es la longitud horizontal del muro y t es el espesor del muro). Si actúan cargas verticales mayores, la relación es $\frac{L}{t} = 40$ y se aplica lo dispuesto en **4.2.3.1**, y si la sección está sujeta a compresión axial y flexión en una dirección, se debe dimensionar para la combinación más desfavorable de dichas acciones, incluyendo los efectos de esbeltez.

El espesor de estos muros no será menor de 130 mm; tampoco será menor que 0.06 veces la altura no restringida lateralmente, a menos que se realice un análisis de pandeo lateral de los bordes del muro, o se les suministre restricción lateral. Los muros diseñados de acuerdo con este inciso no requieren los elementos de refuerzo en los extremos. Para edificaciones de no más de 2 pisos, con altura de entrepiso no mayor que 3 m, el espesor de los muros puede ser de 100 mm.

4.2.3.3 Momentos flexionantes de diseño

En muros en que $\frac{H_m}{L} \geq 2$, (donde H_m es la altura del muro), se considera al momento flexionante de diseño a lo largo de H_{cr} (donde H_{cr} es la altura crítica) con un valor constante e igual al momento M_u obtenido del análisis en la base del muro. La altura H_{cr} debe ser igual a la menor de L o $\frac{M_u}{4V_u}$ (donde V_u es el cortante último). A partir de la altura crítica del muro, se debe usar un diagrama de momentos flexionantes lineal, tal que sea paralelo a la línea que une

los momentos calculados en la base y en la punta del muro (Figura 15).

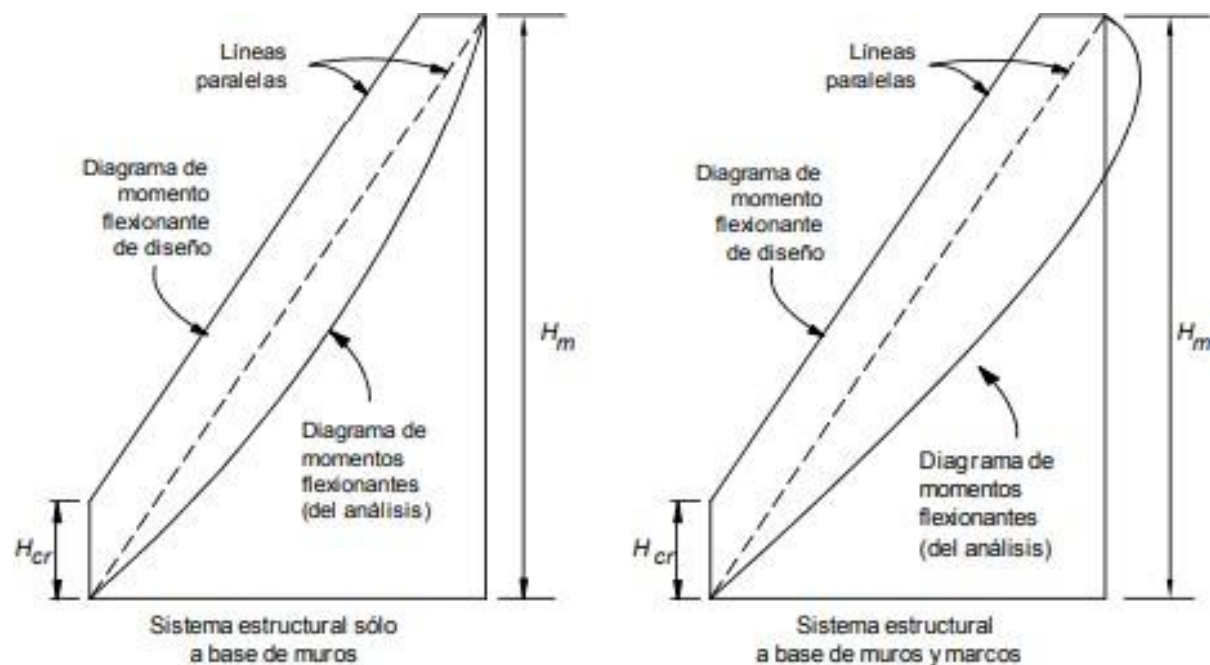


Figura 15 Diagrama de momento flexionante de diseño para muro (Alcocer, 1995)

4.2.3.4 Flexión y flexo-compresión. La resistencia a flexión o flexo-compresión de muros, se puede calcular como si fueran columnas y tomando como base un análisis de compatibilidad de deformaciones, en donde se debe incluir todo el refuerzo vertical colocado dentro de un ancho efectivo de los patines y de los elementos extremos (si existen) y en el alma del muro. El refuerzo que se disponga a ser ubicado en la totalidad del muro debe distribuirse de tal manera que su separación no exceda lo siguiente:

- ✓ La mitad del espesor del muro
- ✓ Seis (6) veces el diámetro de la barra longitudinal más gruesa

✓ 150 mm

El refuerzo horizontal debe ser anclado a los núcleos confinados de los elementos extremos, de manera que puedan alcanzar su esfuerzo de fluencia, como se aprecia en la figura 16.

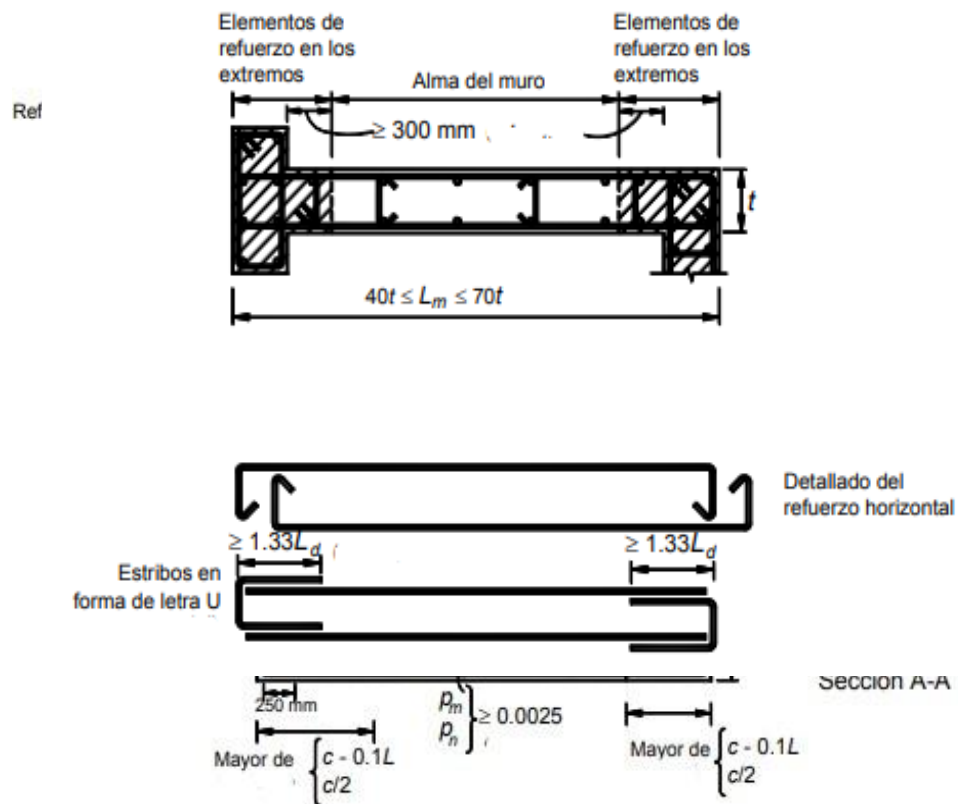


Figura 16 Normas técnicas complementarias para diseño por sismo (Normatividad Mexicana)

4.3. Norma técnica E.030 diseño sismo-resistente. (E.030 Norma Técnica de Diseño Sismo Resistente , S,f) , Normativa de Perú

➤ 4.3.1 Muros

4.3.1.1 Muros de ductilidad limitada ($R = 4$): La mayoría de estas edificaciones se caracterizan por el tipo de sistema estructural, en donde la resistencia sísmica y de cargas de gravedad en las dos direcciones está dada por muros de concreto armado que no pueden llegar a desarrollar desplazamientos inelásticos importantes. En este tipo de sistemas estructurales los muros tienen bajos espesores y se prescinde de extremos confinados y el refuerzo vertical se dispone en una sola hilera, con este sistema se pueden construir edificaciones de máximo 8 pisos.

4.3.1.2 Sistemas estructurales y coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas (R_o)

- Los sistemas estructurales se clasifican según los materiales usados y el sistema de estructuración sismo-resistente en cada dirección de análisis, tal como se indica en la tabla 1.
- Cuando en la dirección de análisis, la edificación presente más de un sistema estructural, se debe tomar el menor coeficiente R_o que corresponda.

Tabla 1***Coefficiente básico de reducción R_o norma E.030***

SISTEMAS ESTRUCTURALES	
Sistema estructural	Coefficiente Básico de Reducción R_o (*)
Pórticos especiales Resistentes a Momentos(SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	5
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	4
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	7
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	4
Pórticos Excéntricamente Arriostrados	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad imitada	4
Albañilería Armada o Confinada	3
Madera	7 (**)

Nota: Norma E.030 de Perú

(*) Estos coeficientes se aplican únicamente a estructuras en las que los elementos verticales y

horizontales permitan la disipación de la energía manteniendo la estabilidad de la estructura.

No se aplican a estructuras tipo péndulo invertido.

(**) Para diseño por esfuerzos admisibles.

4.3.1.3 Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas, R . El coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas es determinado por el producto de R_o determinado en la tabla 1 y de los factores I_a que son las irregularidades estructurales en altura e I_p que corresponde a las irregularidades en planta.

4.3.1.4 Fuerzas de diseño: Este tipo de muros se debe diseñar con fuerzas que sean capaces de soportar la acción simultánea de las cargas axiales, fuerzas cortantes y momentos flectores provenientes del análisis.

4.3.1.5 Espesores mínimos: El espesor mínimo que debe tener este tipo de muros, lo determina la posibilidad de pandeo lateral por flexión de los bordes del muro, salvo que se suministre arriostramiento lateral en los bordes mediante aletas. El espesor mínimo del alma de los muros de ductilidad limitada no debe ser menor de 100 mm.

4.3.1.6 Refuerzo de acero para elementos resistentes a fuerzas inducidas por sismo: El acero que se dispone tanto en forma longitudinal como transversal a los elementos que lleven una responsabilidad sísmica, debe ser corrugado y debe cumplir con las disposiciones de ASTM A 706M. Se permite el empleo de acero de refuerzo ASTM A 615M, grados 280 y 420, en estos elementos siempre y cuando:

- a) La resistencia real a la fluencia (obtenida en ensayos de laboratorio) no sea mayor que el esfuerzo de fluencia especificado F_y , en más de 125 MPa.
- b) La relación entre la resistencia de tracción (f_u) y el esfuerzo de fluencia (F_y), medida en el laboratorio, no sea menor de 1.25.

El refuerzo que se distribuye de forma horizontal y vertical se debe ajustar a:

- Las cuantías mínimas de refuerzo distribuido en el alma, horizontal y vertical, así como los espaciamientos máximos de este refuerzo que son:
- Cuando el V_u sea menor que $0.085\sqrt{f'_c} * A_{cw}$, el refuerzo distribuido debe proporcionarse de acuerdo con los siguientes mínimos:
 - La cuantía de refuerzo horizontal no será menor que 0.002
 - La cuantía de refuerzo vertical no será menor que 0.0015.

O por lo estipulado por:

- I. Donde V_u exceda la resistencia al corte ΦV_c , se debe proveer refuerzo por corte. La resistencia V_s se calcula con la ecuación 5:

$$V_s = A_{cw}\rho_h f_y \quad [5]$$

Donde ρ_h es la cuantía de refuerzo horizontal para cortante con espaciamiento s .

II. La cuantía de refuerzo horizontal para cortante no debe ser menor que 0.0025 y su espaciamiento no debe exceder tres veces el espesor del muro ni de 400 mm.

III. La cuantía de refuerzo vertical para cortante, ρ_v , no debe ser menor que:

$$\rho_v = 0.0025 + 0.5 \left(2.5 - \frac{h_m}{l_m} \right) (\rho_h - 0.0025) \geq 0.0025 \quad [6]$$

Pero no necesita ser mayor que el valor de ρ_h requerido en (I) y h_m es la altura total del muro y l_m es la longitud total del muro.

IV. El espaciamiento del refuerzo vertical para cortante no debe exceder tres veces el espesor del muro ni de 400 mm.

V. Cuando el espesor del muro sea mayor que 200 mm deberá distribuirse el refuerzo horizontal y vertical por cortante en las dos caras del muro.

Con la siguiente salvedad:

❖ Se puede usar malla electrosoldada como refuerzo repartido en muros de edificaciones hasta de 3 pisos, y en el caso de mayor número de pisos, se pueden usar mallas solo en los pisos superiores. Se debe usar acero que cumpla con el numeral 4.3.1.6 en el tercio inferior de la altura. Si se usa malla electrosoldada para el diseño de muros, se debe emplear como esfuerzo de fluencia, el valor máximo de $F_y = 420$ MPa.

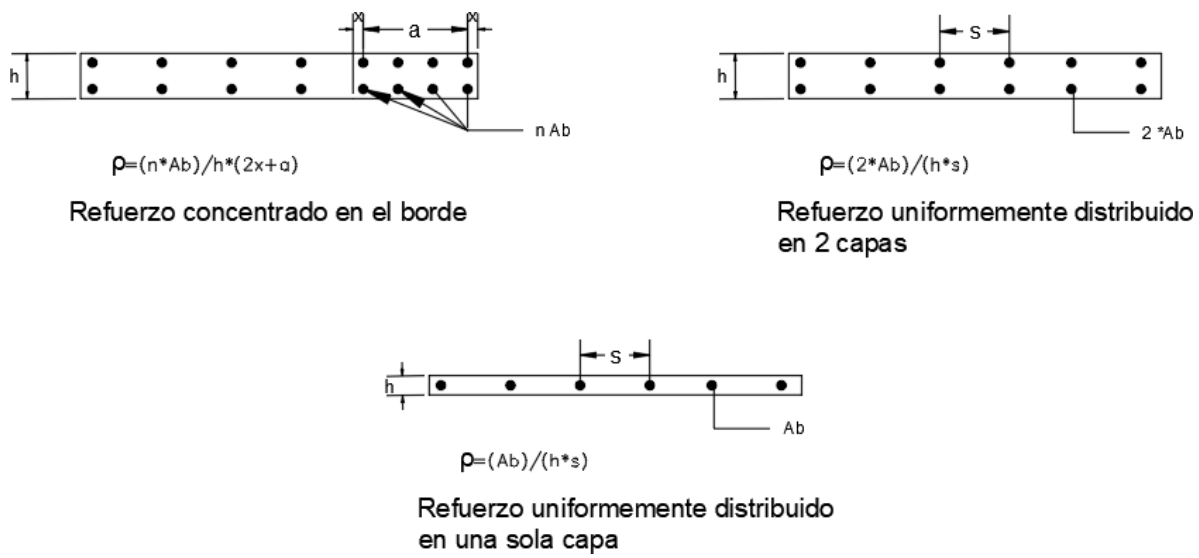


Figura 17 Cuantía de acero en bordes no confinados (E.030 Norma Técnica, S.f).

4.4 Eurocódigo – 8, 2003 (Europa)

El Eurocódigo – 8, admite realizar un análisis elástico de las estructuras con base en la reducción de las ordenadas del espectro de diseño elástico, mediante la aplicación de factores de reducción. En la Figura 18 se muestran los espectros elásticos de diseño correspondientes a la versión 2003 del Eurocódigo – 8, para riesgo sísmico 1.

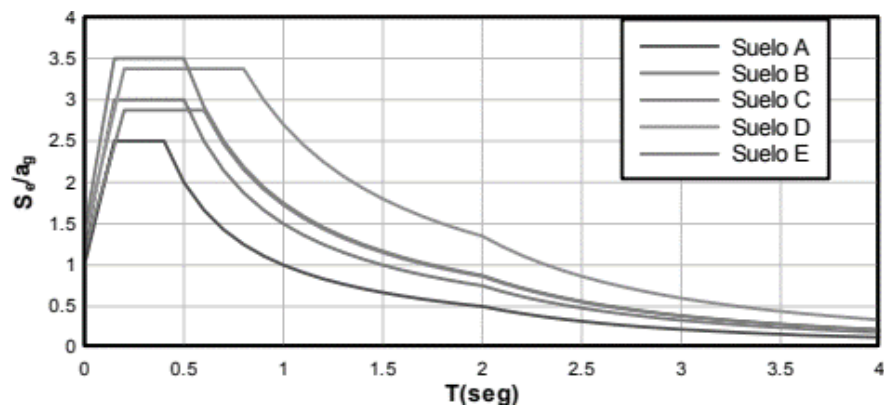


Figura 18 Espectros elásticos de diseño, riesgo sísmico 1

Los factores de reducción son identificados en el Eurocódigo – 8 mediante la letra q , y son aplicados a los espectros elásticos de diseño, para obtener las aceleraciones de diseño; estos factores se encuentran expresados en función de dos términos en la ecuación 7:

$$q = q_0 k_w \geq 1.5 \quad [7]$$

El factor de reducción de respuesta q_0 , depende del tipo de estructura predominante y de la regularidad en elevación, así como del nivel de ductilidad que se espera que la estructura sea capaz de desarrollar, para la cual existen dos niveles: DCM (clase de ductilidad media) y DCH (clase de ductilidad alta); sus valores se muestran en la tabla 2. Otro término, es el factor de predominancia del modo de falla en estructuras con muros de carga k_w .

Tabla 2

Valores sugeridos para el factor básico de reducción de respuesta q_0

Tipo Estructural	DCM	DCH
Sistema porticado, dual o acoplado a muros de corte	$3.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$	$4.5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Sistema con muros de corte	3.00	$4.0 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Sistema torsionalmente flexible	2.00	3.00
Sistema de péndulo invertido	1.50	2.00

Nota: Norma Eurocódigo 8

Los valores de la tabla 2 pueden ser multiplicados por factores adquiridos directamente del

análisis inelástico (Push Over), el cual realiza una relación de los valores de las ordenadas para el cortante basal de diseño y el cortante basal inelástico, lo que se asemeja a considerar la participación del factor de reducción por resistencia R_s . Para los casos que no se efectúa el análisis inelástico estático, se recomienda aplicar los valores de la tabla 3. Cabe señalar, que se incluye en este factor multiplicador el efecto de la redundancia estructural, al considerar valores más altos a medida que el número de vanos y de niveles son mayores que la unidad.

Tabla 3

Valores sugeridos para el factor básico de reducción de respuesta q_o

Sistema con muros de corte	$\frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
Edificación con solo dos muros desacoplados por dirección horizontal	1.00
Edificación con otros sistemas desacoplados de muros	1.10
Edificación con sistemas duales o acoplados a muros estructurales	1.20

Nota: factor básico de reducción de respuesta q_o . (Vielma, Barbat, & Oller , 2007)

Los factores multiplicadores en sus posibles variantes, contienen los incrementos de los factores de reducción de respuesta, basados en la redundancia estructural, que los autores han ubicado entre 1.1 y 1.25, pero que presentan una gran dispersión, por lo que se recomienda la aplicación del análisis inelástico estático. Los factores multiplicadores obtenidos mediante este análisis, no superan el valor de 1.5.

El otro término del factor de reducción de respuesta, tiene que ver con la respuesta de estructuras con predominio de muros de corte. En este caso, se aplica un factor de multiplicación al factor básico q_0 , que es menor que la unidad y que por tanto lo reduce, penalizando en mayor medida el predominio de la falla por cortante que posee una menor capacidad de desarrollar respuesta dúctil en comparación con las edificaciones porticadas. De esta manera, en la medida en que los muros son más esbeltos el valor de k_w se aproxima a su cota inferior que es $1/3$, sin llegar a alcanzarla ya que el Eurocódigo – 8 lo limita expresamente a 0.5 (Vielma, Barbat, & Oller , 2007).

- **Factores de reducción q . Edificaciones con muros de cortante**

Este tipo de sistema estructural alcanza una amplia gama de alineaciones simultáneamente con estructuras porticadas. Se presenta una variante que consiste, además del uso de los factores aplicados a pórticos, en la aplicación de un factor corrector que se modifica en función del modo de falla predominante. Por razones prácticas se exhiben solo los valores extremos para el caso de ductilidad alta, (figura 19, figura 20 y figura 21), (Vielma, Barbat, & Oller , 2007) adoptándose el valor de $k_w = 1$ para casos con predominio de falla por flexión y de $k_w = 0.5$ que es la cota mínima normativa para edificios con fallas por cortante (Vielma, Barbat, & Oller , 2007).

				Factor de Reducción Q							
				Regulares		Irregulares					
						en planta		en elevación		planta elevación	
	q_0	α_u/α_1	k_u	SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC
Sólo dos muros desacoplados	4,00	1,00	1,00	4,00	4,80	4,00	4,80	3,33	4,00	3,33	4,00
Otros sistemas desacoplados de muros	4,00	1,10	1,00	4,40	5,28	4,00	4,80	3,67	4,40	3,33	4,00
Sistemas duales o acoplados a muros	4,00	1,20	1,00	4,80	5,76	4,00	4,80	4,00	4,80	3,33	4,00

Figura 19 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad bajo.

				Factor de Reducción Q							
				Regulares		Irregulares					
						en planta		en elevación		planta elevación	
	q_0	α_u/α_1	k_u	SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC
Sólo dos muros desacoplados	4,00	1,00	0,50	2,00	2,40	2,00	2,40	1,67	2,00	1,67	2,00
Otros sistemas desacoplados de muros	4,00	1,10	0,50	2,20	2,64	2,00	2,40	1,83	2,20	1,67	2,00
Sistemas duales o acoplados a muros	4,00	1,20	0,50	2,40	2,88	2,00	2,40	2,00	2,40	1,67	2,00

Figura 20 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad alto, modo de falla predominante por cortante.

				Factor de Reducción Q							
				Regulares		Irregulares					
						en planta		en elevación		planta elevación	
	q_0	α_u/α_1	k_u	SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC	SPC	CPC
Sólo dos muros desacoplados	3,00	1,00	1,00	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00	2,50	3,00
Otros sistemas desacoplados de muros	3,00	1,10	1,00	3,30	3,96	3,00	3,60	2,75	3,30	2,50	3,00
Sistemas duales o acoplados a muros	3,00	1,20	1,00	3,60	4,32	3,00	3,60	3,00	3,60	2,50	3,00

Figura 21 Factores de reducción para estructuras con muros de cortante, con nivel de ductilidad alto, modo de falla predominante por flexión.

La aplicación de los factores de reducción del Eurocódigo – 8 no conduce a la obtención de valores únicos para una ductilidad esperada, más bien se produce un rango de valores que

dependen, por un lado, de la capacidad para disipar energía que se atribuye a las estructuras, y a su sobre-resistencia y por el otro lado, de los controles de diseño por parte del proyectista, que a la larga aseguran el cumplimiento de las prescripciones sismo-resistentes, lo cual redunda en el incremento de la capacidad disipativa de la estructura (Vielma, Barbat, & Oller , 2007).

Los factores de reducción presentan dos ramas: la rama creciente y constante, pero esta última se reduce una vez que se alcanza el periodo máximo de aceleración constante del espectro elástico de diseño. Además, el Eurocódigo – 8 define un valor mínimo de aceleración de diseño para los periodos altos, razón por la que se observa la modificación de la rama descendente del espectro de factores de reducción. (Figura 22).

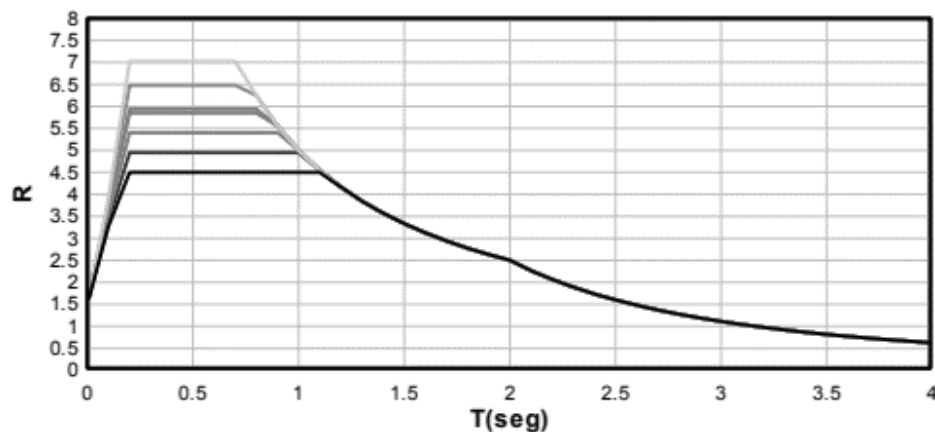


Figura 22 Espectros de factores de reducción

- **Cuantías mínima y máxima de la armadura vertical en muros**

Para la cuantía mínima de armadura vertical en cara traccionada de muros, se adopta el máximo de los siguientes valores:

$$A_{s,vmin} = 0.0012 A_c \quad \text{si} \quad f_{yk} = 400 \text{ MPa} \quad [8]$$

$$A_{s,vmin} = 0.009 A_c \quad \text{si} \quad f_{yk} = 500 \text{ MPa} \quad [9]$$

Armadura mecánica a disponer en la zona traccionada:

$$A_{s,vmin} = \frac{0.04 A_c f_{cd}}{F_{yd}} \quad [10]$$

En la cara comprimida, se adopta un valor de $0.30 A_{s,vmin}$.

Para la cuantía máxima de armadura vertical en muros, se adopta $A_{s,vmax} = 0.04 A_c$

Dónde: $A_{s,v \min}$ es el valor de acero de vertical mínimo de refuerzo, A_c es el área de concreto y F_{yk} es el esfuerzo de fluencia del acero, f_{cd} es la resistencia del concreto a compresión, F_{yd} es la resistencia del acero a compresión.

- **Cuantía mínima de la armadura horizontal en muros**

Se adoptan los siguientes valores:

$$A_{s,hmin} = 0.004 A_c \quad \text{si} \quad f_{yk} = 400 \text{ MPa} \quad [11]$$

$$A_{s,hmin} = 0.0032 A_c \quad \text{si} \quad f_{yk} = 500 \text{ MPa} \quad [12]$$

Dónde: $A_{s,hmin}$ es el acero de refuerzo horizontal mínimo

La armadura horizontal se debe repartir en las dos caras. Además, se adoptan las siguientes reglas sobre colocación:

- En el caso de muros vistos por ambas caras, se debe disponer la mitad de la armadura en cada cara.
- En caso de muros con espesores superiores a 500 mm, se considera un área efectiva de espesor máximo de 500 mm, distribuidos en dos zonas de 250 mm en cada cara, ignorando la zona central que queda entre ambas zonas.

La cuantía mínima horizontal puede reducirse a $A_{s,hmin} = 0.002 A_c$, en cualquiera de los siguientes casos (Calculo civil: calculo de estructuras, 2020):

- Cuando la altura del muro sea superior a 2.5 m, y siempre que esta distancia no sea menor que la mitad de la altura del muro.
- Cuando se dispongan juntas verticales de contracción a distancias inferiores a 7.5 m.

4.5 Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.

4.5.1 Empleo del coeficiente de disipación de energía, R . Cuando en el estudio de microzonificación sísmica se propongan espectros que tiendan a la aceleración del terreno cuando el período de vibración tiende a cero, el coeficiente de disipación de energía R_C a emplear en el diseño de la estructura cuando se utiliza este tipo de espectros, tiene un valor variable en la zona de períodos cortos, iniciando en el valor prescrito de R ($R=\Phi_a\Phi_p\Phi_rR_0$), para períodos iguales a T_0 y tendiendo a la unidad cuando el período tiende a cero, como muestra la tabla 4. El valor de R_C esta descrito por (NSR-10 , S,f):

$$R_C = (R - 1) \frac{T}{T_0} + 1 \leq R \quad [13]$$

Donde: R_C = Coeficiente de capacidad de disipación de energía definido para la zona de periodos cortos menores de T_C en función del valor de R , cuando se exige así en los estudios de microzonificación. Definido en la ecuación A.2.9.1 de la normativa sismo resistente colombiana (NSR-10 , S,f).

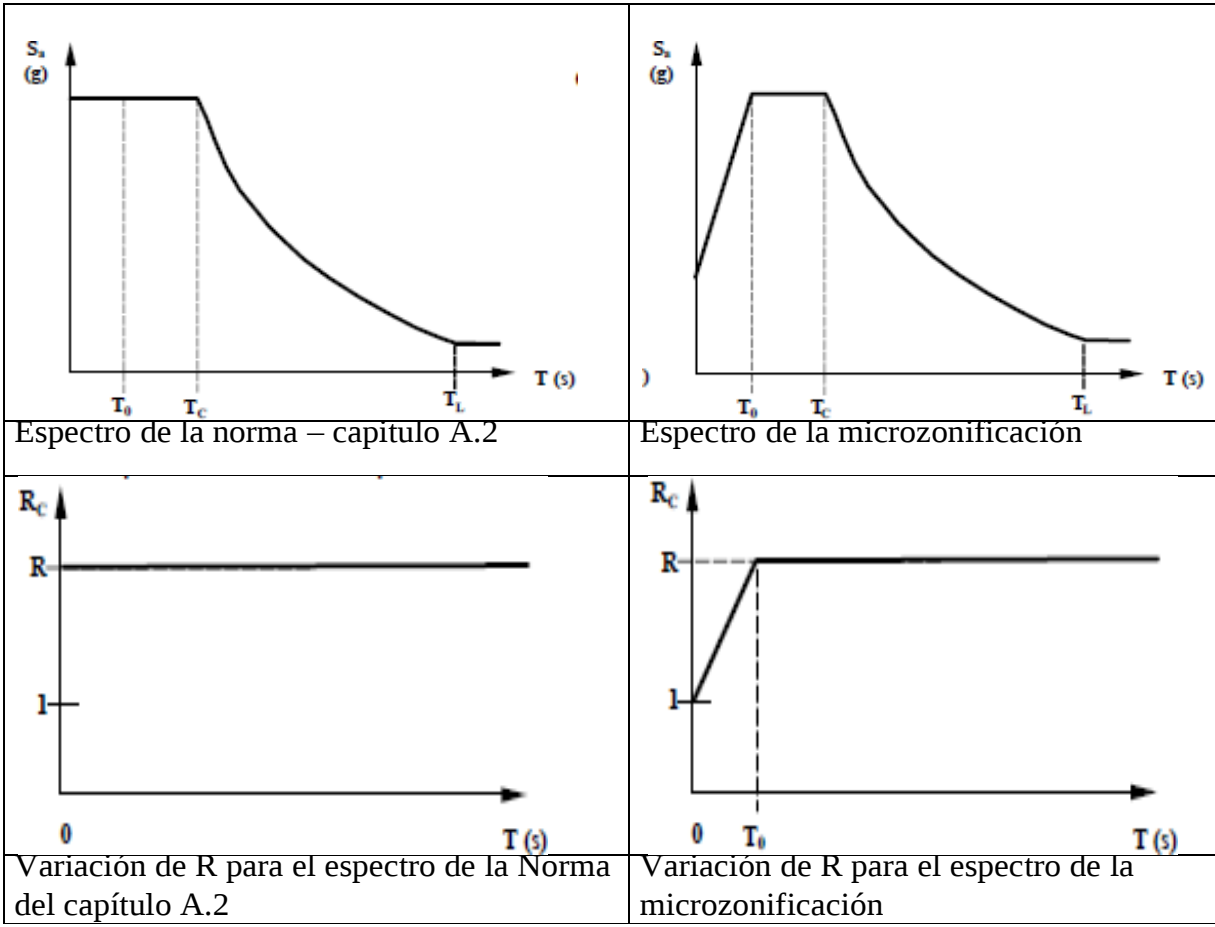
T = Periodo de vibración del sistema elástico, en segundos

T_0 = Periodo de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones, en segundos.

R = Coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño,

corresponde al coeficiente de disipación de energía básico, R_0 , multiplicado por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en altura, en planta, y por ausencia de redundancia en el sistema estructural de resistencia sísmica ($R=\Phi_a\Phi_p\Phi_rR_0$). Ver capítulo A.3 de la norma sismo resistente colombiana (NSR-10, S,f).

Tabla 4
Variación del coeficiente de disipación de energía R



Nota: Reglamento colombiano de construcción Sismo (NSR-10, S,f).

➤ **4.5.2 Capacidad de disipación de energía mínima Requerida.** Dependiendo de los materiales estructurales y de las características del sistema de resistencia sísmica, se establecen los grados de capacidad de disipación de energía mínimos (DES, DMO o DMI) que debe cumplir el material estructural en las diferentes zonas de amenaza sísmica definidas.

➤ **Zona de amenaza sísmica baja:** Es el conjunto de lugares en donde tanto A_a como A_v son menores o iguales a 0.10.

➤ **Zona de amenaza sísmica intermedia:** Es el conjunto de lugares en donde A_a o A_v , o ambos, son mayores de 0.10 y ninguno de los dos excede 0.20.

➤ **Zona de amenaza sísmica alta:** Es el conjunto de lugares en donde A_a o A_v , o ambos, son mayores de 0.20.

➤ **4.5.3 Valor máximo de R permitido.** Con las excepciones de edificaciones con pisos livianos, o sea cuando la masa de los pisos localizados por encima del nivel donde se inicia un sistema estructural, sea menor del 10% de la masa total, M y cuando la estructura es muy rígida en comparación de los pisos inferiores, este tipo de combinación de sistemas estructurales en la altura presenta grandes inconvenientes en el comportamiento sísmico, y que para este reglamento no es un sistema aceptable, además cuando la estructura combine en la altura diferentes sistemas estructurales variando sus rigideces en los pisos inferiores se clasifica como irregular del tipo Piso débil – discontinuidad en la resistencia o Piso débil – discontinuidad extrema en la resistencia.

- **Piso débil – discontinuidad en la resistencia (NSR-10 , S,f)** – Cuando la resistencia del piso es menor del 80% de la del piso inmediatamente superior pero superior o igual al 65%, entendiendo la resistencia del piso como la suma de las resistencias de todos los elementos que comparten el cortante del piso para la dirección considerada, la estructura se considera irregular y se toma un valor máximo de $R = 0.9$.

- **Piso débil – discontinuidad extrema en la resistencia** – Cuando la resistencia del piso es menor del 65% de la del piso inmediatamente superior, entendiendo la resistencia del piso como la suma de las resistencias de todos los elementos que comparten el cortante del piso para la dirección considerada, la estructura se considera irregular y se toma un valor máximo de $R = 0.8$.

Y el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , en cualquier dirección y en cualquier nivel, como máximo, debe ser mayor al valor de R de los sistemas estructurales que se estén combinando por encima de ese nivel y en la dirección considerada. Deben cumplirse los requisitos de diseño exigidos para cada sistema estructural y para cada grado de capacidad de disipación de la energía material estructural.

➤ **4.5.4 Combinación de sistemas estructurales en planta (NSR-10 , S,f)**

- a) Cuando la estructura tiene un sistema de muros de carga únicamente en una dirección, el valor de R para diseñar la dirección ortogonal, no puede ser mayor que 1.25

veces el valor de R del sistema estructural de muros de carga.

b) Cuando la estructura tiene dos sistemas de muros de carga diferentes en la misma dirección, para el sistema que tiene el mayor valor de R, el valor a emplear no puede ser mayor que 1.25 veces el valor de R del sistema con el menor valor de R.

➤ **4.5.5 Reducción del valor de R para estructuras irregulares y con ausencia de redundancia.**

Cuando la estructura está clasificada como irregular, el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía, R, que se utilice en el diseño sísmico de la edificación, debe reducirse multiplicándolo por Φ_p , debido a irregularidades en planta, por Φ_a , debido a irregularidades en altura, y por Φ_r , debido a ausencia de redundancia, como lo indica la ecuación.

$$R = \Phi_a \Phi_p \Phi_r R_0 \quad [14]$$

Cuando una edificación tiene varios tipos de irregularidad en planta simultáneamente, se debe aplicar el menor valor de Φ_p . Análogamente, cuando una edificación tiene varios tipos de irregularidad en altura simultáneamente, se debe aplicar el menor valor de Φ_a .

➤ **4.5.6 Características y especificaciones mínimas para el diseño de muros según la NSR-10.** Los muros deben ser diseñados de forma que logren resistir cargas excéntricas y

cualquier carga lateral o de otro tipo a las que estén sometidas. Estos diseños deben cumplir los requisitos de refuerzo mínimo, solicitaciones de diseño a compresión, diseños a cortante, y como muros esbeltos.

4.5.6.1 Muros diseñados como elementos de compresión. Los muros que son sometidos a cargas axiales o a variaciones de cargas axiales y de flexión, deben ser diseñados basados en las siguientes condiciones:

a) Todo tipo de elementos sometidos a cargas axiales y de flexión deben tener como base las siguientes condiciones (NSR-10 , S,f):

✓ La deformación unitaria del refuerzo y del concreto deben ser proporcionales a la distancia del eje neutro.

✓ La máxima deformación unitaria de la fibra extrema que se encuentre sometida a compresión del concreto debe ser 0.003.

✓ Cuando el refuerzo se encuentre sometido a un esfuerzo menor que F_y se debe tomar como ϵ_s veces la deformación unitaria del acero y para deformaciones unitarias mayores que F_y , el esfuerzo se debe considerar independiente de la deformación unitaria igual a F_y .

$$\epsilon_s < \epsilon_y \quad A_s f_s = A_s E_s \epsilon_s \quad [15]$$

$$\varepsilon_s \geq \varepsilon_y \qquad A_s f_s = A_s F_y \qquad [16]$$

Donde:

$\varepsilon_s < \varepsilon_y$ = Deformación unitaria de fluencia

A_s = Área de refuerzo, no preesforzado, que trabaja a tracción, expresada en mm^2 .

f_s = Esfuerzo de tracción en el acero de refuerzo, expresado en MPa.

F_y = Resistencia nominal a la fluencia en el acero de refuerzo, expresada en MPa.

E_s = Módulo de elasticidad del refuerzo, expresado en MPa.

✓ La resistencia a la tracción en elementos de concreto reforzado no se debe considerar a la hora del diseño.

✓ La relación que existe entre los esfuerzos de compresión en el concreto y la deformación unitaria en el concreto se debe suponer de tal forma (el esfuerzo no es proporcional a la deformación unitaria) que origine una predicción de resistencia que concuerde con los resultados de ensayos representativos (NSR-10 , S,f).

✓ La condición anterior se logra satisfacer con una distribución rectangular de modo que el esfuerzo en el concreto se pueda definir como:

i. El valor de esfuerzo en el concreto de $0.85 f'_c$ distribuida de manera uniforme en la franja de compresión equivalente, limitada por los bordes de la sección transversal y por

la línea paralela al eje neutro a una distancia $a = \beta_1 c$ medida desde la fibra máxima de compresión.

ii. Para valores de:

$$17 \text{ MPa} < f'_c < 28 \text{ MPa} \quad \beta_1 = 0.85 \quad [17]$$

$$f'_c > 28 \text{ MPa} \quad \beta_1 = \text{disminuye de forma lineal a razón de } 0.05 \text{ por cada } 7 \text{ MPa}$$

$$\beta_1 \geq 0.65$$

✓ La resistencia de diseño al aplastamiento no debe exceder $0.85 f'_c$

4.5.6.2 Muros diseñados por método empírico. Este método solo es aplicable para los elementos de sección transversal rectangular. Los elementos que no tengan esta forma se deben diseñar de acuerdo a **4.5.6.1**.

La resistencia axial de diseño ϕP_n de un muro debe calcularse mediante:

$$\phi P_n = 0.55 \phi f'_c A_g \left[1 - \left(\frac{kl_c}{32h} \right)^2 \right] \quad [18]$$

$$\phi = 0.90 \text{ Secciones controladas por traccion}$$

$$\phi = 0.65 \text{ Secciones controladas por traccion}$$

Y el factor de longitud efectiva K para muros arriostrados en la parte superior e inferior con el fin de evitar desplazamientos laterales y:

$$k = 0.8 \text{ Restringido contra la rotación en uno o ambos extremos}$$

$$k = 1.0 \text{ No restringido contra la rotación en ambos extremos}$$

$$k = 2.0 \text{ No arriostrados con el fin de evitar el desplazamiento lateral}$$

ϕP_n = Resistencia axial de diseño

f'_c = resistencia nominal del concreto a la compresión, expresada en MPa.

A_g = Área bruta de la sección de concreto, mm².

h = Espesor total del elemento, mm.

k = Factor de longitud efectiva para elementos de compresión.

l_c = Longitud del elemento a compresión, mm.

ϕ = Factor de reducción de resistencia.

4.5.6.3 Diseño alternativo para muros esbeltos. Este tipo de muros deben ser diseñados de tal forma que el panel del muro sea diseñado como un elemento simplemente apoyado, cargado axialmente, sometido a cargas lateralmente uniformes fuera del plano (perpendiculares al plano), con momentos y deflexiones máximas a media altura, también deben tener un control a la tracción y el refuerzo de diseño debe proporcionar:

$$\phi M_n \geq M_{cr} \quad [19]$$

4.5.6.4 Refuerzo mínimo (NSR-10 , S,f). El refuerzo mínimo tanto vertical como horizontal debe cumplir con las siguientes disposiciones:

- ❖ Cuantía mínima para refuerzo vertical ρ_t es:
 - ❖ 0.0012 para barras corrugadas no mayores que No 5 (5/8") o 16 mm con $F_y > 420$ MPa
 - ❖ 0.0015 para otras barras corrugadas
 - ❖ 0.0012 para refuerzo electrosoldado de alambre (liso o corrugado)
- ❖ Cuantía mínima para refuerzo horizontal ρ_t es:
 - ❖ 0.0020 para barras corrugadas no mayores que No. 5 (5/8") o 16 mm con $F_y > 420$.
 - ❖ 0.0025 para otras barras corrugadas
 - ❖ 0.0020 para refuerzo electrosoldado de alambre (liso o corrugado)
- ❖ Los muros con un espesor mayor de 250 mm, deben tener refuerzo en cada dirección, colocado en dos capas paralelas a las caras del muro de acuerdo con:
 - ❖ Una capa consistente en no menos de 1/2, y no más de 2/3 del refuerzo total

requerido para cada dirección. Debe colocarse no menos de 50 mm ni más de $1/3$ del espesor del muro a partir de la superficie exterior.

❖ La otra capa, consistente en el resto del refuerzo requerido en esa dirección, debe colocarse a no menos de 20 mm ni a más de $1/3$ del espesor del muro a partir de la superficie interior.

❖ El refuerzo vertical y horizontal debe espaciarse a no más de tres veces el espesor del muro, ni de 450 mm.

❖ El refuerzo vertical no necesita de confinamiento por estribos laterales, cuando el refuerzo vertical no es mayor de 0.01 veces el área total de concreto, o cuando el refuerzo vertical no se requiere como refuerzo de compresión.

❖ Alrededor de vanos de ventanas, puertas y aberturas de similar tamaño, deben colocarse por lo menos dos barras N° 5 (5/8") o 16 mm en todos los muros que tengan dos capas de refuerzo en ambas direcciones y una barra No. 5 (5/8") o 16 mm en los muros que tengan una sola capa de refuerzo en ambas direcciones. Estas barras deben estar ancladas para que logren desarrollar el F_y en tracción en las esquinas de las aberturas.

En la figura 23 y 24, se puede apreciar la configuración típica de un edificio con sistema de muros industrializados y su respectiva distribución de acero de refuerzo.

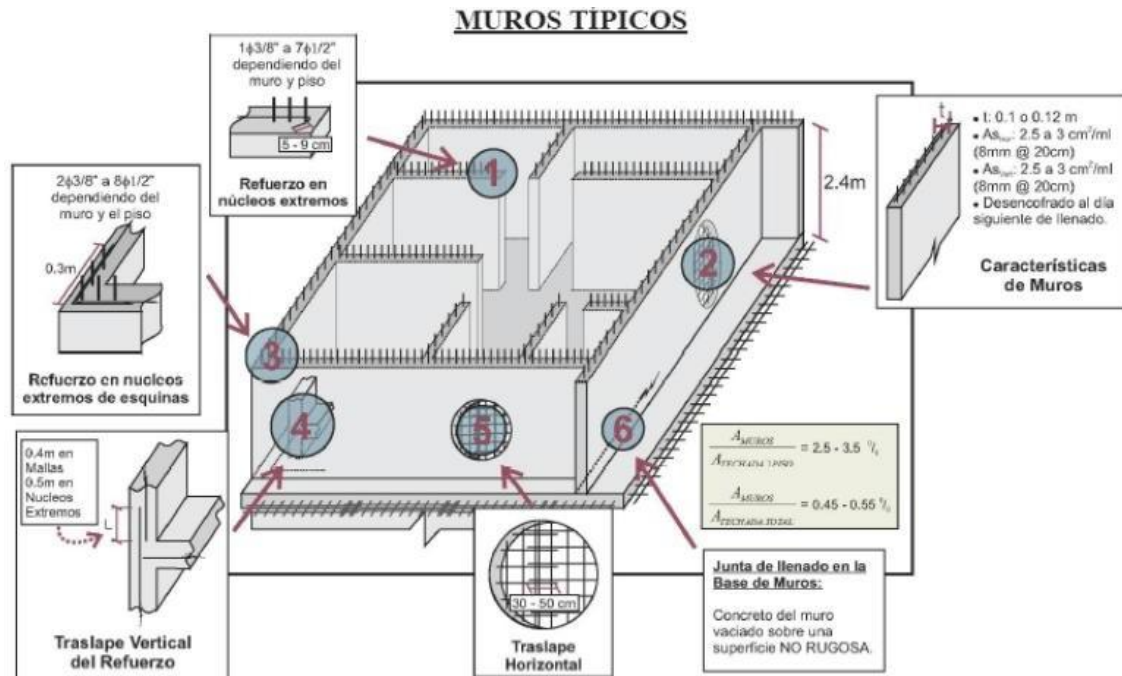


Figura 23 Muros típicos en una edificación convencional con sistema de muros de ductilidad limitada

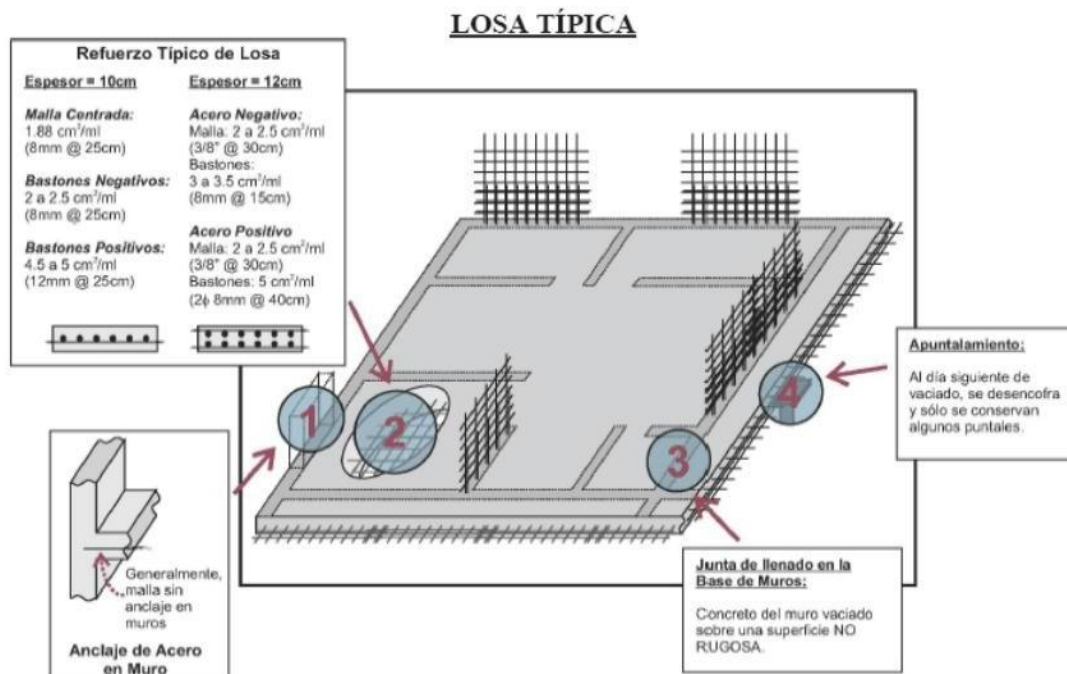


Figura 24 Muros típicos en una edificación convencional con sistema de muros de ductilidad limitada.

5. Análisis de aplicación del coeficiente de disipación de energía R

En Colombia se aplica el sismo sin reducir con R para revisar las derivas, Luego que han sido verificadas y se ha determinado que la estructura es lo suficientemente rígida por norma, se pasa a diseñar los elementos, pero no con las fuerzas sísmicas del sismo de diseño sino con las fuerzas sísmicas reducidas por el coeficiente de disipación de energía R. Si se considera que la estructura debe soportar toda la demanda sísmica en el rango elástico, se estará castigando excesivamente la estructura y por consiguiente se dará lugar a que se requieran miembros estructurales más robustos o resistentes, lo que evidentemente genera un aumento en las dimensiones de los elementos de la construcción.

El factor de reducción R, no solo considera la ductilidad global, si no también diversas formas de sobrerresistencias, que se espera, puedan desarrollar las estructuras “tipificadas” que satisfagan los correspondientes requisitos normativos. A grosso modo, lo que la ductilidad permite básicamente en la estructura, es que más allá que la estructura sobrepase el límite elástico, tenga una capacidad adicional de disipar energía impuesta por el sismo. Una estructura que posea una adecuada ductilidad es capaz de avisar que va colapsar, brindando la posibilidad de contar con el tiempo suficiente para evacuar la edificación. Con el factor de reducción R, se pretende eliminar la necesidad tan solo a la verificación de los límites normativos, y que las derivas resultantes se satisfagan. Es por ello, que después del análisis lineal, las derivas elásticas se incrementan por el factor de reducción R y se reducen por la sobre resistencia.

Por lo tanto, si se observa el factor de reducción R ($R = 1$), asumiendo que la estructura

carece de ductilidad, el aporte de capacidad por sobre resistencia, no solo castiga excesivamente la estructura respecto a su capacidad en el rango lineal (elástico), sino que también se obtienen en consecuencia derivas mayores, a que si se considera un factor de reducción R mayor ($R > 1$). Por lo tanto, será más difícil satisfacer los límites normativos de las derivas resultantes.

El proceso de diseño a grandes rasgos, para la mayoría de las normativas puede explicarse mediante los siguientes pasos:

- I. Se parte de un pre-diseño en donde orientándose por ciertos criterios o artilugios, se definen preliminarmente los miembros estructurales y se determinan sus capacidades minoradas.
- II. Se determinan las demandas mayoradas, producidas por diversas combinaciones de las acciones especificadas en las normativas. “Aquí es donde entra en juego el factor de reducción R , si se consideran acciones sísmicas”.
- III. Se verifica que las capacidades minoradas de los miembros estructurales sean superiores (pero aproximados) a las solicitaciones impuestas por las demandas mayoradas; incluyendo de ser el caso, el efecto $P - \Delta$, por lo que se requiere repetir el numeral I y verificar nuevamente.
- IV. Una vez satisfecho el numeral III, se procede a verificar las derivas y la separación

mínima entre estructuras próximas (si las hay) y consecuentemente de no satisfacerse las derivas límites, se repiten los numerales I, III y IV. Si aun así, no se consigue una solución al problema, o si la solución es inviable por cualquier razón, se debe pensar en modificar o reformar el sistema estructural, atendiendo en lo posible aquello en donde se presente principalmente el problema.

v. Una vez satisfecho lo indicado en el numeral IV puede decirse, ahora sí, que se ha concluido el diseño.

El Ph.D (Klingner, 2007) en los comités E.030 y E.060 del 2007, sugirió proponer un valor del factor de modificación de respuesta sísmica, que contemplara las características de los sistemas de muros de ductilidad limitada (SMDL), y que cumpliera con los siguientes parámetros:

- a) Establecer los sismos determinados de comparación y desarrollar juegos idóneos de registros para aquellos sismos.
- b) Identificar para el sistema estructural bajo consideración, las posibles estructuras arquetípicas y ubicarlas de manera hipotética en diferentes zonas geográficas del país.
- c) Evaluar mediante ensayos de laboratorio, la respuesta de los elementos esenciales de las estructuras arquetípicas y de las estructuras mismas.

- d) Diseñar las diferentes estructuras arquetípicas usando diferentes valores de tanteo del factor de reducción de respuesta elástica (R) y evaluar sus respuestas.
- e) Con base en las respuestas en función de R , proponer valores de diseño, incluyendo los efectos de sobre resistencia; de la confiabilidad de sismos de entrada; de la confiabilidad de los resultados de laboratorio; la confiabilidad de los resultados analíticos; de la confiabilidad constructiva; y de la confiabilidad histórica (Klingner, 2007).

5.1 Prescripciones de la norma Sismo - Resistente (NSR-10) para el diseño de muros estructurales de concreto reforzado

Para el caso en estudio de edificaciones de muros delgados estructurales de concreto reforzado, las derivas evaluadas para las fuerzas sísmicas sin reducir, no deben ser mayores al 1% de la altura del piso, límite prescrito por la NSR-10. Este límite se puede llevar hasta el 1.4%, si se emplea la metodología de secciones fisuradas en el análisis. Según el detallado que se realice al refuerzo, la capacidad de disipación de energía se clasifica en especial – DES – (Permitida en todas las zonas de amenaza sísmica, con un coeficiente de reducción de fuerza sísmica básico de $R_o = 5$) (Briceño & Carerras , 2013).

La verificación del requerimiento de elementos de borde, es similar a la definida en la (An ACI Standard and Report, 2008), en la que se utiliza la evaluación de esfuerzos de compresión en fibras extremas o la estimación de la profundidad del eje neutro. El acero se

puede disponer de una malla electrosoldada o de barras corrugadas, y pueden ser ubicadas en una sola capa para los muros con espesores menores a 250 mm (Vélez J. , Blandón, Bonett, Arteta, & Carrillo , 2004).

Cabe resaltar las modificaciones que se hicieron recientemente a la NSR-10, que afectan a los muros estructurales con capacidad de disipación moderada y especial, (DMO y DES) y por generalización a muros delgados. Estas modificaciones se nombran a continuación (Velez & Riveros , 2018):

- i. Obligatoriedad de revisar la estabilidad lateral en la dirección perpendicular al plano de muros.
- ii. Obligatoriedad a justificar técnicamente con fundamentación en experimentaciones el uso de muros estructurales de espesor menor a 100 mm.
- iii. Énfasis en que los elementos de borde para muros, cuando sean requeridos, deben armarse como columnas confinadas no susceptibles a falla por pandeo lateral, lo que conlleva a que sea prácticamente inevitable disponer de elementos de borde sin tener que introducir un ensanchamiento del muro.

Aunque los aspectos referidos en la (Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcción Sismo Resistente, 2017) en la resolución 0017 del 04 de diciembre de 2017 son un avance, la NSR-10 y la mayoría de códigos internacionales no presentan lineamientos

o prescripciones para el diseño de muros delgados, a excepción del código peruano (E.030, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018), que introdujo el sistema estructural de edificaciones de muros de ductilidad limitada.

5. Caso en Estudio

Debido a las múltiples ventajas que este sistema ofrece en cuanto a economía, rapidez de construcción y estandarización de formaletas, el sistema tuvo una gran acogida en Colombia y en países suramericanos para la construcción de edificaciones de vivienda con sistema de muros industrializados. En Colombia, se emplea este sistema en todo tipo de alturas (hasta 25 pisos) y en todas las zonas de amenaza sísmica (Vélez & Riveros, 2018), por lo que se hace necesario realizar un estudio de diferentes normativas y su exigencia para el diseño de muros industrializados, logrando identificar su relación y su posible efectividad a la hora de presentarse un evento sísmico por medio de un modelamiento numérico en el software ETABS.

Descripción

A continuación, se presenta la planta tipo de una edificación ubicada en un municipio colombiano de amenaza sísmica alta y diseñada bajo la norma sismoresistente colombiana vigente NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) (Figura 25 y 26).

Las características del caso de estudio consisten en una edificación de 5 pisos y su respectiva cubierta, destinada para un uso de vivienda. El sistema estructural implementado

para esta edificación son muros industrializados o muros de carga en concreto reforzado con capacidad de disipación especial de energía (DES). Las características típicas de esta edificación para el caso de los muros, son los bajos espesores (100 mm), el tipo de refuerzo (por lo general malla electrosoldada, dispuesta en una sola capa, complementada en algunos casos con barras en los extremos), la ausencia de confinamiento y la longitud de muros y sus múltiples configuraciones, la edificación cuenta con una altura de 13 metros y un área de la planta en piso de 195.78 m². El sistema utilizado para la cimentación está conformado por vigas de cimentación corrida variando su sección de acuerdo a la evaluación de cargas.

La rigidez de los elementos tipo muro ha sido considerada en el plano principal y en dirección perpendicular al plano del elemento, mediante el empleo de elementos de área tipo Shell. La rigidez en el plano principal se calcula a partir de las propiedades geométricas y mecánicas definidas para cada sección sin considerar efectos de fisuración, con el objeto de no sobreestimar la capacidad de estos elementos en su plano débil y que su diseño este gobernado por las acciones en el plano principal. El análisis de diseño de los muros se realiza en las dos direcciones. Las placas de entrepiso y diafragmas, de acuerdo con la norma sismoresistente colombiana NSR-10 en el capítulo A.3, para el sistema estructural utilizado en el proyecto los elementos horizontales de entrepiso no participan en la rigidez ante cargas sísmicas, como se requiere en la normativa sismoresistente colombiana NSR-10 en la sección A.3.6.1. Para la modelación de las placas de entrepiso se utilizan elementos tipo Shell, pero limitando su rigidez en el plano y fuera de él, con el propósito que no se aporte rigidez ante cargas de origen sísmico y su empleo se limite a la transmisión de cargas a los elementos verticales. Figuras 27 y 28.

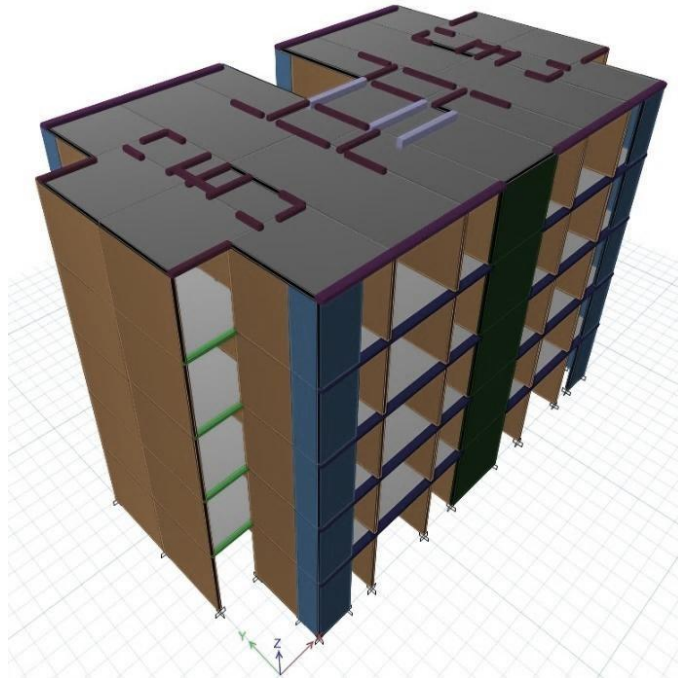


Figura 235 Visualización del modelo de la edificación en estudio
Fuente: Elaboración propia

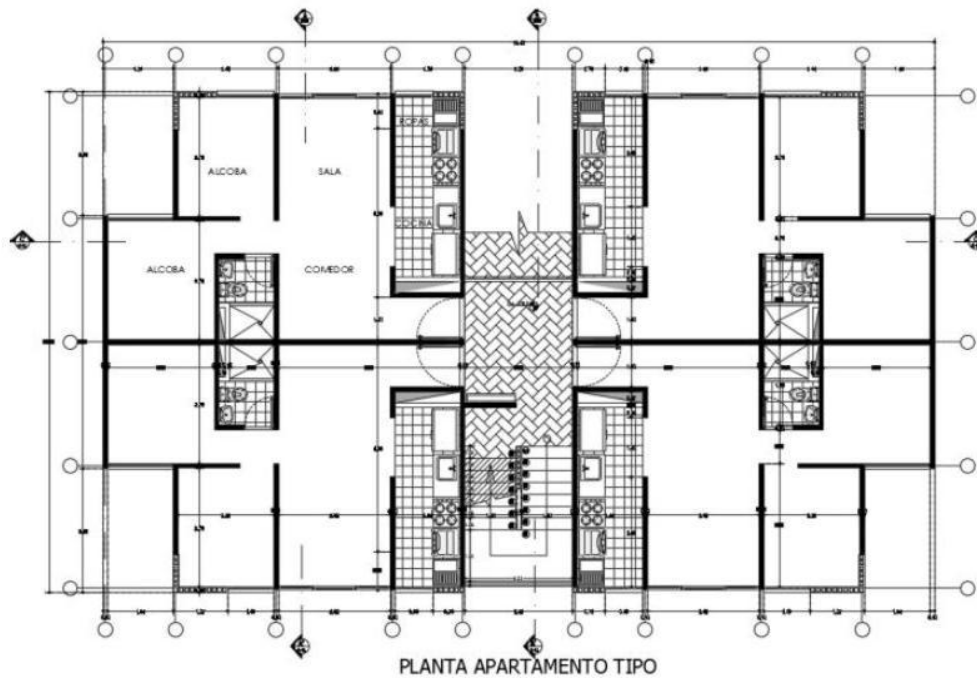


Figura 246 Planta tipo para la edificación en estudio de 5 pisos con muros delgados localizado en zona de amenaza sísmica alta colombiana

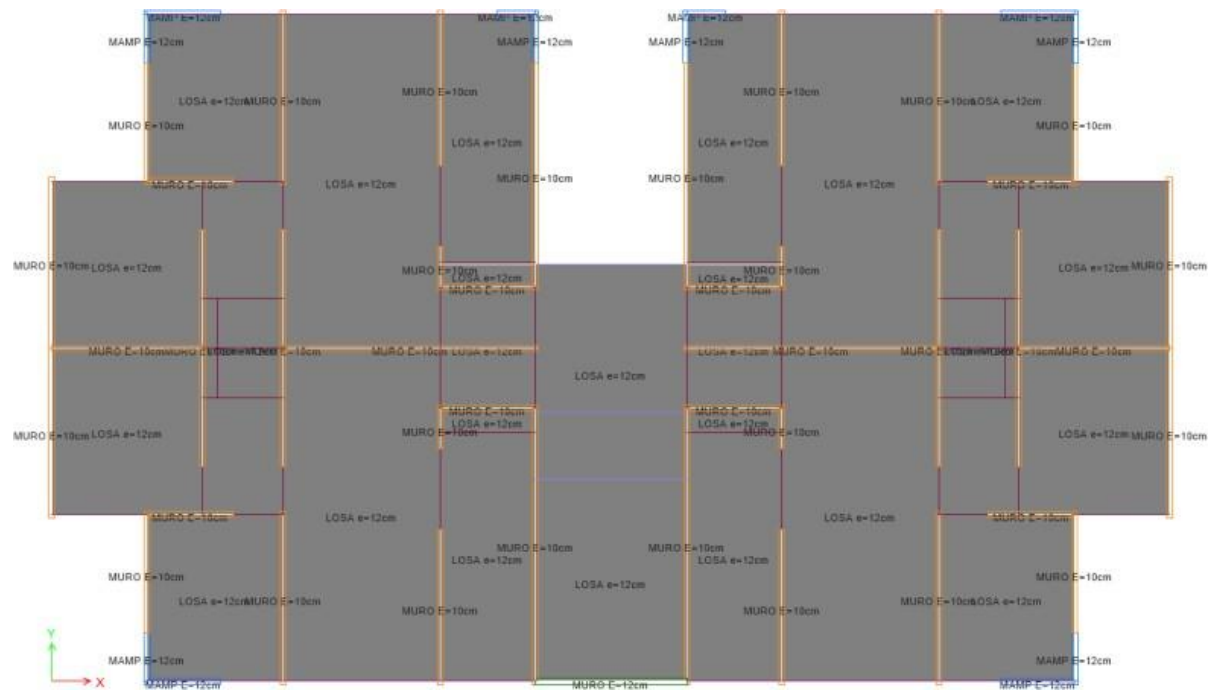


Figura 257 Secciones de muros y losa en nivel de cubierta Fuente: Elaboración propia.

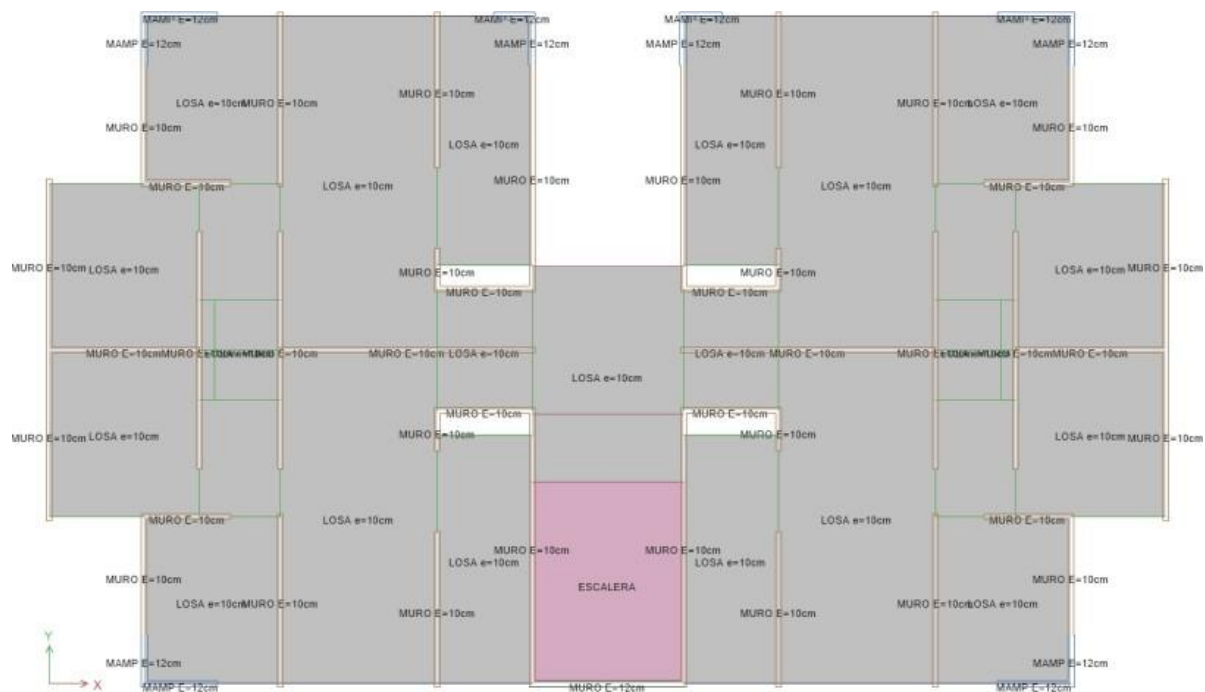


Figura 268 Secciones de muros y losa en nivel de piso tipo Fuente: Elaboración propia.

Como se ha venido explicando, los bajos espesores y las características propias del sistema de edificios con muros industrializados implementado en Colombia, conllevan a que la capacidad de disipación de energía de estos edificios sea menor que la de aquellos con muros gruesos y bien confinados. Debido a lo mencionado anteriormente, el mejor enfoque a considerar es el de tener una ductilidad limitada para este tipo de sistemas de muros industrializados, tal como lo hace el código peruano, que parece ser el más adecuado, aunque diferentes investigaciones sugieren que las prescripciones de dicho código pueden ser insuficientes (Gonzales & Lopez, 2011). Estas edificaciones son diseñadas con sistemas de muros portantes, que usan las distintas paredes divisorias de cada ambiente, como elementos estructurales que reciben las losas de entrepiso y que toman las cargas de fuerza horizontal de sismo y las cargas por gravedad, por lo que se deben diseñar como elementos que están sometidos a flexo-compresión y a fuerza cortante.

A continuación, se realiza un análisis comparativo de los resultados del diseño de la edificación de 5 pisos de la Figura 25, teniendo en cuenta que estos muros no tienen núcleos confinados debido a su pequeño espesor, y considerando que en algunos proyectos se usan mallas electrosoldadas que tienen menos ductilidad que el acero de refuerzo convencional. Por lo tanto, se deben considerar unos valores del coeficiente de reducción de fuerza sísmica por ductilidad, para hallar los valores con el cual se realizará el análisis al diseño, que para el caso de Colombia se utiliza un valor de $R = 5$ (Valor convencional de la NSR-10 para edificios con muros estructurales DES), para el caso de Perú y México se utiliza $R = 4$ (valor convencional de la normativa mexicana y peruana para edificaciones con sistema de muros delgados

industrializados), y $R = 1$ para el caso en que se realiza el modelamiento de la estructura sin reducir la fuerza sísmica.

El objetivo de estas comparaciones, es obtener valores de referencia al considerar los diferentes casos, según las normatividades empleadas (Briceño & Carerras , 2013). Cabe resaltar que la norma peruana E.030, mexicana NTC - RSEE, el Eurocódigo - 8, la norma norteamericana ACI - 318 y la norma colombiana NSR – 10, manejan coeficientes de reducción sísmicos similares (Vélez J. , Blandón, Bonett, Arteta, & Carrillo , 2004), aunque los primeros son menores, por lo que varían los criterios a la hora de realizar los diseños y sobre todo al momento de ajustar los espesores y su respectivo reforzamiento (Briceño & Carerras , 2013).

Generalmente, los muros de un edificio no tienen la misma longitud y, por lo tanto, los muros más largos toman la mayor fuerza cortante. (Figura 29). Los estudios realizados a este tipo de edificaciones indican que la mayoría tienen en una dirección de la planta mayor cantidad (Vélez C. , y otros, 2017). de muros, los cuales pueden tener espesores de 100 mm y es posible que se dispongan muros con espesores más bajos; mientras que en la dirección perpendicular tienen menor cantidad de muros y longitudes más pequeñas, lo que afecta su rigidez lateral y resistencia, para lo cual se deben unir los muros con vigas invertidas, que para estos casos se deben usar espesores mínimos de muros de 150 mm, garantizando el espaciamiento mínimo entre el acero de refuerzo, independientemente de la densidad de cada muro y su dirección. Lo ideal, es tener muros de longitudes similares, de manera tal que

los esfuerzos no se concentren solo en algunos muros. Cuando los muros tienen longitudes muy grandes, se recomienda realizar juntas y de esta manera hacer que los muros tengan dimensiones similares (Briceño & Carreras, 2013). Cuando se tienen edificios de mayor número de pisos o cuando la densidad de muros en una dirección es relativamente baja, se debe aumentar el espesor de los muros, pudiendo tener en los primeros pisos espesores de hasta 200 mm de espesor.

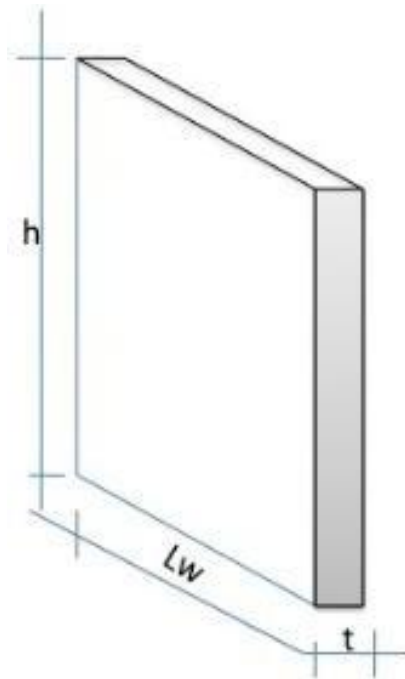


Figura 279 Dimensiones de un muro de concreto reforzado

Fuente: Elaboración propia.

h = Altura del muro

L_w = Longitud del muro

t = Espesor del muro

Este tipo de sistema estructural al tener todos sus elementos de concreto (muros y losas) generan esfuerzos importantes en los procesos de retracción en el fraguado y por los cambios de temperatura (NSR-10 , S,f). Estos esfuerzos dependen del contenido inicial de agua, temperatura y de humedad del medio ambiente, y de la naturaleza de los agregados, generando así fisuras en los pisos más bajos. Cabe resaltar que las fisuras ocasionadas por retracción y fraguado así como por temperatura, no representan una afectación para el edificio, excepto aquellas de tipo diagonal que se suelen presentar en los muros (Blasco, 2004). Un muro con una grieta diagonal importante ha perdido rigidez lateral y resistencia, por lo que debe ser reparado para restituir las condiciones iniciales en el diseño.

Otros problemas que se presentan en este tipo de edificaciones, son sus bajos espesores (100 mm) debido a que impiden un vaciado adecuado; la altura a la que se hace el vaciado; y las interferencias que se presentan por los aceros de refuerzo, tuberías sanitarias, de ventilación y eléctricas. Esto con el fin de reducir costos y tener mayor rentabilidad, por lo que se está exagerando en los diseños y se están construyendo edificios de gran altura con muros de bajos espesores (Vielma, Barbat, & Oller , 2007). Las normas en estudio restringen estas construcciones a un determinado número de pisos, correspondiente a máximo 8 pisos, utilizando los criterios mencionados previamente. En la figura 30 se observan las respuestas típicas y el conjunto de edificaciones que se pueden ver severamente afectados por un evento sísmico.

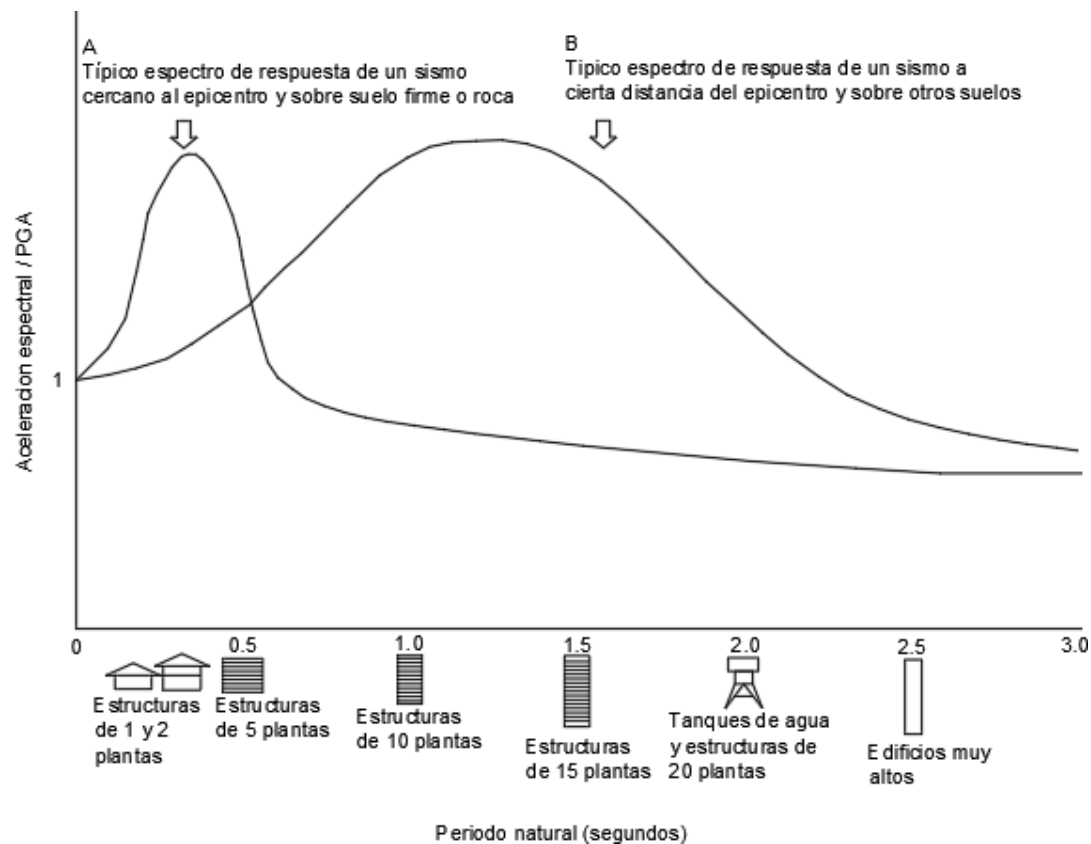


Figura 3028 Ejemplos típicos de respuesta, junto el tipo de edificios que pueden verse más afectados (Belen & Cabañas, 1999).

La curva A, corresponde a un movimiento típico en un emplazamiento cercano al epicentro, situado sobre suelo duro (roca). El valor pico se presenta a alta frecuencia o bajo periodo del orden de 0.3 s, por lo que el movimiento será más dañino para estructuras bajas y rígidas que vibren con este periodo natural. En la curva B se observa la forma típica de un espectro en un emplazamiento a larga distancia del epicentro, situado en suelo blando, desplazándose el valor máximo hacia mayores periodos del orden de 1 s, el movimiento representando será especialmente dañino para estructuras altas y flexibles, con este periodo propio (Belen & Cabañas, 1999). Un ejemplo real de este tipo de comportamiento quedó

reflejado durante el terremoto de Michoacan (México) de 1985. En ciudad de México situada a unos 400 km del epicentro, el movimiento llegó con largos periodos, debido a la larga distancia recorrida. El lecho acuífero sobre el que se asienta la ciudad tiene un alto periodo natural, el cual se encuentra entorno a los 2 s. El efecto de resonancia entre el movimiento y el suelo, amplificó notablemente las aceleraciones para este periodo, y el terremoto causó serios daños particularmente en edificaciones altas de 10 a 20 pisos, recientemente construidos; mientras que edificios bajos y de adobe, más viejos y débiles sufrieron daños menores. Este evento ilustra la importancia del contenido frecuencial del movimiento en el daño causado. De ahí la necesidad de incluir este aspecto en la caracterización sísmica de emplazamientos con fines de diseño.

El modelo se realizó con el software ETABS V16.2 (Computers and Structures Inc. 2016). Otras suposiciones de análisis y diseño que también fueron empleadas en el diseño real del edificio (según se verificó en los planos y memorias de cálculo) se muestran a continuación:

Consideraciones de cargas

- Análisis y diseño tradicional bajo los lineamientos de la norma sismoresistente Colombiana (NSR-10 , S,f).
- Diafragmas rígidos en su plano, pero con rigidez despreciable fuera del plano
- Cargas Muertas

Cargas muertas de acabados 1.60 kN/m^2

Carga muerta promedio en piso tipo 5.07 kN/m^2

Carga muerta promedio en Cubierta 5.69 kN/m^2 Cargas Vivas

➤ Cargas vivas

Cargas Vivas de Vivienda 1.80 kN/m^2

Carga Viva de Cubierta de placa 1.80 kN/m^2 (Tabla B.4.2.1-2 NSR-10, “Cubiertas, Azoteas y Terrazas con acceso totalmente limitado al personal de mantenimiento)

➤ Carga viva de escalera 3.00 kN/m^2 .

➤ Masas sísmicas debidas exclusivamente a las cargas muertas

➤ Análisis con secciones brutas

➤ Análisis dinámico espectral

➤ Consideración de los efectos ortogonales

Parámetros sísmicos

➤ Zona de amenaza sísmica alta (aceleración pico efectiva $A_a = 0.20$, velocidad pico efectiva $A_v = 0.25$)

➤ Tipo de suelo C (factores de amplificación por efectos locales $F_a = 1.20$, $F_v = 1.55$)

➤ Grupo de uso residencial (coeficiente de importancia $I = 1.0$)

➤ Edificio regular en planta y en altura, y redundante estructuralmente ($\Phi_p = 1.0$, $\Phi_a = 1.0$, $\Phi_r = 1.0$) de modo que $R = R_o$

➤ Concreto de los muros $f'_c = 3500 \text{ psi} \approx 24.5 \text{ MPa}$, placas, vigas y cimentación $f'_c = 3000 \text{ Psi} \approx 21 \text{ MPa}$

Acero

- Refuerzo acero corrugado grado 60, con límite de fluencia $F_y = 420$ MPa Mallas electrosoldadas $F_y = 420$ MPa

Estribos de todos los elementos y varillas de $\varnothing \frac{1}{4}$ " $F_y = 420$ MPa Varillas N°3 ($\varnothing \frac{3}{8}$ " y mayores $F_y = 420$ MPa)

Concreto

- Muros: $f'_c = 3500$ psi (24.5 Mpa)

Aspectos Dimensionales y Funcionales

- Altura del edificio 13.00 m
- Área en planta del piso tipo 195.78 m²
- Área en planta de cubierta 195.78 m²

6. Análisis de Resultados

Es difícil realizar una comparación entre las diferentes normas en estudio debido a la variabilidad de rigidez que imponen los diferentes códigos, los límites máximos de las derivas y los procedimientos y cálculos de diseño sismo-resistente.

Tomando como referencia el estudio realizado por (Andrade, 2004), en su trabajo de

tesis “*Control de la deriva en las normas de diseño sismo resistente de 2004*”, él determina que, para poder verificar la efectividad de las normas, se debe tener en cuenta el periodo de vibración T , debido a que las normas varían su efectividad de acuerdo a este valor.

Si se verifica el valor del periodo de la estructura a la que se le está realizando el estudio, se puede evidenciar que este se mantiene, ya que no se le han realizado cambios en materiales ni en la geometría, y que, al afectar las fuerzas sísmicas por los coeficientes de reducción sísmico, los valores del periodo no van a sufrir ningún cambio. Los cambios se verán reflejados en el momento en que dejen de cumplir con las solicitaciones mínimas de resistencia sísmica de cada normativa en estudio, las cuales varían según cada país. Estas variaciones son más representativas en el acero de refuerzo, debido a que aumentan las cuantías, y en los muros delgados debido a que aumenta el concreto para los elementos de borde, logrando de esta manera cambiar la geometría de los elementos y por lo tanto modificando el periodo T .

Los eventos sísmicos ocurridos en otros países, han servido de experiencia, las cuales han recobrado importancia, ya que la construcción de edificaciones con sistemas de muros de ductilidad limitada ha venido aumentando en los últimos años. Este auge, se debe a que este tipo de muros tiene un comportamiento doble, son portantes y son muros de corte ante un evento sísmico.

La norma colombiana no habla a profundidad sobre este tipo de sistema estructural. El

comportamiento del sistema estructural no es dúctil, y en consecuencia tiene una respuesta frágil ante sismos de alta frecuencia o bajo periodo, como se puede apreciar en la Figura 30. Consecuentemente este tipo de material ya no trabaja dentro de un rango elástico, sino que trabaja dentro de un rango inelástico. Para el diseño, ejecución y construcción de la edificación con este tipo de sistema estructural, es recomendable realizar un análisis de diseño por desempeño, donde se logre obtener resultados del comportamiento de la estructura y de acuerdo a ello, determinar el nivel de riesgo en el cual se encuentra con esta cantidad de acero.

Esta práctica, quizá haga que se requiera mayor cantidad de acero, sobre todo de acero corrugado, más el acero de la malla electrosoldada; y que por tratarse de una unidad residencial se tendría que utilizar un espectro, y además el nivel de performance o el nivel de desempeño estructural también debe diseñarse para un sismo raro con un nivel de desempeño de seguridad.

Para el caso de estudio, la estructura solo cuenta con el diseño estructural resistente con el espectro de diseño, lo que la hace vulnerable en consideración con los requisitos mencionados anteriormente y que se deberían tener en cuenta (Velez & Riveros , 2018). Además, se debe considerar que la mayor concentración de esfuerzos se va a encontrar en las esquinas de los muros, que son originadas por el movimiento sísmico de tracción y compresión, lo que ayudará a disipar la mayor cantidad de esfuerzos (Blasco, 2004). Esto se presenta mayormente en los muros pequeños o de tipo modular y es en esa tracción o en esa compresión en donde empiezan a fallar, dejando en evidencia un comportamiento inelástico, produciendo un esfuerzo y no una rotula plástica, traduciéndose en energía no disipada. Consecuentemente

(Velez & Riveros , 2018) en un muro de este tipo, el acero corrugado cumple una función primordial, la cual no se limita únicamente a ayudar en el mejoramiento del comportamiento sísmico, sino que además incrementa el amortiguamiento que se va a tener con este sistema, que para el caso en estudio tampoco es el ideal, debido a que la cantidad de acero corrugado es mínima y a que la mayoría de los muros tienen malla electrosoldada como acero de refuerzo, teniendo un comportamiento frágil que se impacta directamente la capacidad de desplazamiento y de ductilidad en los muros siendo su límite de fluencia mayor o igual al de una varilla corrugada, lo que limita el correcto desempeño o de respuesta ante eventos sísmico (Velez & Riveros , 2018).

Al tratarse de un sistema de muros de ductilidad limitada, no se recomienda tener muros largos y menos con malla electrosoldada. Las longitudes de los muros deben ser todas similares (Blasco, 2004). Se recomienda que tengan medidas de longitud iguales a las de la mampostería confinada, es decir aproximadamente de 4 m, y de esta manera lograr un mejor desempeño, un mejor comportamiento y un mejor performance estructural.

Muchos libros (Blasco, Los edificios de muros delgados de concreto y las nuevas normas para su diseño, 2004) y ensayos hablan de la literatura, hablan que además de la malla electrosoldada, se deben incluir bastones verticales en el 1/3 y en el último tercio de los muros, logrando el confinamiento de todo el concreto, debido a que estas zonas son las más vulnerables al momento de ocurrir un sismo. Aun con estas características, no se puede disminuir el espesor de los muros, ya que se debe garantizar el recubrimiento mínimo, sin incluir las características del proceso constructivo como lo es el vaciado del concreto sin que se produzca

una segregación de los materiales, debido a, la altura desde la cual se hace el vertido, la cantidad de elementos no estructurales como redes eléctricas, sanitarias e hidráulicas, y a la difícil tarea de verter el concreto por medio de estos elementos, sin afectarlos y logrando un adecuado vaciado, de manera que el concreto quede sin hormigueros.

En los resultados obtenidos por la modelación, se muestra que el periodo modal más alto se presenta en el primer modo y a medida que cambia de modo este periodo modal va disminuyendo (figura 31).

Case	Mode	Period sec
Modal	1	0.231
Modal	2	0.168
Modal	3	0.165
Modal	4	0.055
Modal	5	0.037
Modal	6	0.036
Modal	7	0.026
Modal	8	0.017
Modal	9	0.017
Modal	10	0.016
Modal	11	0.014
Modal	12	0.011

Figura 31: Periodos modales (Elaboración propia)

En la participación de la masa modal, también se puede apreciar que la mayor participación se encuentra en el primer modo y a medida que cambia de modo esta participación va disminuyendo, como se puede apreciar en la figura 32.

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
Modal	1	0.231	0.6898	0	0	0.6898	0	0
Modal	2	0.168	0.0475	0.0003	0	0.7373	0.0003	0
Modal	3	0.165	1.662E-05	0.7169	0	0.7373	0.7172	0
Modal	4	0.055	0.1924	0	0	0.9298	0.7172	0
Modal	5	0.037	0.0015	0	0	0.9313	0.7172	0
Modal	6	0.036	0	0.211	0	0.9313	0.9281	0
Modal	7	0.026	0.0478	0	0	0.9791	0.9281	0
Modal	8	0.017	0.0167	0	0	0.9959	0.9281	0
Modal	9	0.017	5.528E-07	1.6E-06	0	0.9959	0.9281	0
Modal	10	0.016	0	0.0524	0	0.9959	0.9805	0
Modal	11	0.014	0.0041	0	0	1	0.9805	0
Modal	12	0.011	2.033E-05	1.461E-06	0	1	0.9805	0

Figura 32: Participación de masa modal (Elaboración Propia)

Cuando se verifican los desplazamientos horizontales (derivadas), se puede apreciar que antes de cualquier afectación por los coeficientes de reducción sísmica se deben controlar las derivadas, debido a que el R no afecta la estructura pues depende de los materiales y de la geometría de los elementos que lo componen. Por lo tanto y según la normativa colombiana NSR-10, las derivadas para estructuras de concreto reforzado no pueden ser mayores al 1%; para el caso de la normativa peruana E.030, las estructuras de concreto reforzado no pueden tener una derivada mayor al 0.7%; para el caso de la normativa de México NTC-RSEE, las estructuras en concreto reforzado no pueden superar el 1.2%; para el caso de la norma norteamericana ACI-318-14, las estructuras de concreto están clasificadas según el grupo de uso I, II o III y dependiendo de este, se debe cumplir con las derivadas máximas permitidas, las cuales son del 2%, 1.5% y 1% según corresponda; y para el Eurocódigo-8 deben ser menores de 2%.

Según las derivas obtenidas mediante el modelo numérico, en la tabla 5, se puede apreciar que cumple con todas las normativas en estudio debido a que la máxima deriva en X es de 0.155% y la máxima deriva en Y es de 0.067%.

Tabla 5

Verificación de cumplimiento de derivas entre normativas

Normativa	Deriva en X	Deriva en Y	Deriva máxima permitida	
	(%)	(%)	(%)	
Colombia NSR-10	0.155	0.067	1.0	
Norte Americana ACI 318-14	0.155	0.067	Tipo I	2.0
			Tipo II	1.5
			Tipo III	1.0
Perú E.30	0.155	0.067	0.7	
México (NTC-RSEE)	0.155	0.067	1.2	
Europa Eurocódigo 2 y 4	0.155	0.067	2.0	

Nota: Elaboración Propia

Las derivas en cada uno de los niveles se presentan en la tabla 6:

Tabla 6**Resumen de las derivas del piso**

Nivel	Dirección	Deriva
N+2.9	X	0.0588
	Y	0.0233
N+5.5	X	0.1181
	Y	0.0487
N+8.1	X	0.1456
	Y	0.0622
N+10.7	X	0.1554
	Y	0.0671
N+13.3	X	0.1525
	Y	0.0561

Nota: Elaboración Propia

Como se puede ver en la tabla 6, la mayor deriva se presenta en los pisos del nivel N+10.7, lo que corresponde al piso 5 de la estructura en estudio. El mayor esfuerzo se presenta en los primeros niveles, por lo que son estos, los que sufren la mayor cantidad de daño al momento de un evento sísmico. Los muros de los primeros pisos deben contar con un mayor espesor y mayor refuerzo, para evitar los daños que se puedan ocasionar durante el evento sísmico y que le permitan a la estructura disipar la mayor cantidad de energía posible, y lograr una falla dúctil sin que se llegue a presentar el colapso. Las derivas obtenidas en todos los niveles cumplen con las normas en estudio debido a que ninguna de ellas supera los límites máximos permitidos. En la tabla 7 se observa los requerimientos mínimos exigidos por las diferentes normatividades.

Tabla 7**Resumen de espesores mínimos permitidos según cada normatividad**

NORMATIVA	ESPESTORES MINIMOS		ACERO PERMITIDO EN MUROS DE			
	PERMITIDOS PARA MUROS DE		DUCTILIDAD LIMITADA			
	DUCTILIDAD LIMITADA (mm)		(F _y > 420 MPa)			
	Edificaciones < 3	Edificaciones > 3	Edificaciones < 3	Edificaciones > 3		
	pisos	pisos	pisos	pisos		
Colombiana NSR – 10	Muros estructurales convencionales	Muros estructurales convencionales	- Barras	- Barras	- Barras	- Barras
			Corrugadas	Corrugadas		
			- Malla	- Malla	- Malla	- Malla
			Electrosoldada	Electrosoldada		
Norte Americana ACI 318 – 14	>= 130 mm	>= 130 mm	- Barras	- Barras	- Barras	- Barras
			Corrugadas	Corrugadas		
			- Malla	- Malla	- Malla	- Malla
			electrosoldada	electrosoldada		
Perú E.030	<= 100 mm	>= 100 mm	- Barras	- Barras	- Barras	- Barras
			Corrugadas	Corrugadas		
			- Malla	- Malla	- Malla	- Malla
			electrosoldada	electrosoldada		
México (NTC – RSEE)	>= 100 mm	>=130 mm	- Barras	- Barras	- Barras	- Barras
			Corrugadas	Corrugadas		
			- Malla	- Malla	- Malla	- Malla
			electrosoldada	electrosoldada		
Europa Eurocódigo - 8	Muros estructurales convencionales	Muros estructurales convencionales	- Barras	- Barras	- Barras	- Barras
			Corrugadas	Corrugadas		
			- Malla	- Malla	- Malla	- Malla
			electrosoldada	electrosoldada		

Nota: Elaboración Propia

- Según la ecuación $b = h_u/16$, el espesor mínimo es de 130 mm.
- Únicamente en los dos últimos pisos y con refuerzo en los 2/3 del muro y con bastones en acero corrugado en los extremos del muro. (En Perú está permitido máximo hasta los 8 pisos) (E.030 Norma Técnica , S,f)
- Cuando son edificaciones de máximo 2 pisos y con altura de entre piso menor o igual a 3
- Cuando son edificaciones con alturas mayores a los 8 pisos.

Las edificaciones construidas en Colombia no cumplen con las normas extranjeras (ver Tabla 7), debido a que no se cumplen los espesores mínimos en los muros, ni con el tipo de refuerzo, por lo tanto se sugiere realizar modificaciones a la NSR-10, en donde sean incluidos los criterios establecidos en las normas extranjeras, para el diseño de muros delgados y de ductilidad limitada, como es el caso de la norma peruana y mexicana.

7. Conclusiones

Todas las estructuras y elementos se deben diseñar de acuerdo a los requisitos establecidos en las diferentes normativas, con el fin de obtener en cualquier sección, una resistencia igual a la requerida al momento de mayorar las cargas y las fuerzas, para esto, es necesario que el muro tenga un espesor apropiado para resistirlas. Por lo tanto, se recomienda que los espesores no sean menores de 100 mm, teniendo en cuenta los criterios establecidos en las normativas analizadas en este documento, y los resultados obtenidos en investigaciones como “*Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading – Engineering structures*” (Blandon, y otros, 2018), en la cual se sugieren mayores espesores que garanticen un buen recubrimiento y un buen vertimiento de concreto, permitiendo una correcta distribución por todos los espacios sin que se generen hormigueros.

El uso de las mallas electrosoldadas está regulado en la normativa colombiana, en la ACI 318-14, en el Eurocódigo y en la normativa peruana, sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de esta, solo está permitido en los 2 últimos niveles y a 2/3 de la altura del muro en la normatividad peruana. Además, este tipo de refuerzo según la norma sismo resistente colombiana NSR-10, la ACI, la normatividad peruana y el eurocodigo no está permitido en todo tipo de elementos como lo es el caso de columnas, muros, y en los elementos de borde de los muros de concreto estructural. De igual manera, no está permitido para el caso de muros ubicados en zonas de amenaza sísmica alta o cuando se inducen deformaciones unitarias de compresión que excedan 0.003 (Vielma, Barbat, & Oller , 2007).

La normativa colombiana indica que cuando el refuerzo vertical del muro excede la cuantía de 1% del área de la sección horizontal del muro, o este refuerzo vertical se requiere como refuerzo de compresión, el muro debe armarse como una columna, lo que conlleva a no usar malla electrosoldada. En caso de usar mallas electrosoldadas, se deben tener en cuenta las especificaciones establecidas dentro de la normatividad como por ejemplo, ubicar bastones de acero corrugado en el primer y último tercio de los muros, dándole un mayor refuerzo a la estructura (NSR-10 , S,f).

El espesor mínimo que debe tener un muro, debe ser aquel que le permita resistir los esfuerzos impuestos por las cargas de gravedad, por las fuerzas de la naturaleza y los efectos inducidos por los asentamientos del suelo y las variaciones de temperatura. El espesor mínimo no debe ser menor del espesor definido en cada norma (100 mm o 1/16 de la altura del entrepiso), eligiendo el valor que represente mayor criticidad. Esto, teniendo en cuenta que la mayoría de estudios indican que una edificación con un sistema de muros de ductilidad limitada no debe tener bajos espesores en sus muros, y que estos deben tener un refuerzo en barras corrugadas y no en malla electrosoldada.

Se debe considerar que la normativa colombiana no prescribe un espesor mínimo de muros y no presenta lineamientos de análisis y diseño diferenciados en función del espesor de los mismos. En esta normativa se solicitan estudios inelásticos para analizar el comportamiento de la estructura ante un sismo, por lo que es usual que se empleen los mismos criterios para

el diseño de edificios con muros gruesos y delgados. Por lo tanto, se recomienda considerar los criterios establecidos en la normativa peruana para el diseño de muros delgados de ductilidad limitada.

Para poder realizar una verificación de normas y comparar su efectividad, se deben realizar variaciones no solo del coeficiente de disipación de energía **R**, sino también, se debe afectar su geometría o la de sus elementos, buscando que el periodo de vibración varíe y de esta manera comprobar la efectividad entre normas, según el rango del periodo de vibración.

Debido a los diferentes espectros de movimientos desde los epicentros y la ubicación de las estructuras y los suelos de fundación donde se han edificado, se deben considerar las altas frecuencias o bajos periodos según sean los casos. Para el caso de la edificación en estudio, la cual está situada en un suelo de fundación duro o roca, la frecuencia se presenta del orden de 0.3 s, por lo que el movimiento será más dañino para estructuras bajas y rígidas (entre 1 y 6 pisos) que vibren dentro de este periodo natural.

Debido a la variedad de los procedimientos de cálculo para los diseños sismo-resistente que son implementados en cada normativa, se dificulta realizar una comparación de efectividad de los modelos.

Los edificios diseñados con muros delgados presentan características que afectan directamente su capacidad de disipación de energía en el rango inelástico, como es la ausencia de confinamiento, susceptibilidad a la inestabilidad lateral y refuerzo frágil (malla

electrosoldada), debido a que usualmente se colocan bajas cuantías y en una sola capa, esto, sin contar la altura con la que se realiza el vertimiento del concreto el cual puede generar segregación en los materiales.

El estudio del edificio con un análisis básico enfocado a los desplazamientos, permitió observar que la solicitud de desplazamientos para los sismos de diseño es baja, de modo que no se inducen comportamientos inelásticos en ninguno de sus muros.

Se debe tener en cuenta la posibilidad de incorporar a la normativa colombiana NSR-10, una prescripción de un espesor mínimo de muros y de acero de refuerzo, que presente lineamientos de análisis y diseño, diferenciados en función del espesor, para evitar que se usen los mismos criterios con que se diseñan los muros gruesos.

Para que este tipo de sistemas estructurales tengan un desempeño sismo-resistente adecuado, se debe realizar un análisis de diseño por desempeño para ver el rendimiento de la estructura y de acuerdo a ello, el nivel de riesgo en el cual se encuentra, con la cantidad de acero con la que fue diseñada.

Al diseñar este tipo de muros se deben ubicar barras de refuerzo en los extremos, ya que es en estas zonas donde se concentran los esfuerzos por los movimientos sísmicos, y consecuentemente ayuda a disipar la concentración de esfuerzos. Además, el acero corrugado va a tener la función de ayudar al mejoramiento sísmico, y ayudará a incrementar el

amortiguamiento que se va a tener en el sistema.

La determinación del espesor debe satisfacer un control de esbeltez por compresión, un diseño por flexo-compresión, y un diseño por fuerza cortante. Adicionalmente, se deben verificar los problemas locales en algunas zonas de los muros, debido a que muchas de las veces, los espesores de los muros no están controlados por la verificación realizada sino por el diseño a flexo-compresión y fuerza cortante.

Se debe tener en cuenta la altura de la edificación o cuando la densidad de muros en una dirección es relativamente baja, ya que esto puede aumentar el espesor de los muros en los primeros pisos.

Debido a que toda la estructura es de concreto reforzado, se deben considerar los efectos de retracción por fraguado, y por los cambios de temperatura, ya que estos producen deformaciones y cambios en el volumen. Todos estos cambios, dependen del contenido inicial de agua, de temperatura, de humedad del ambiente y de la naturaleza de los agregados, los cuales se deben seleccionar y verificar al momento de realizar el vaciado.

Se debe analizar la posibilidad que el sistema estructural utilice losas aligeradas ya que el estudio “Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011” (Briceño & Carerras , 2013) demuestra que se producen menos fisuras que cuando se utilizan losas macizas.

Considerando los resultados obtenidos en el estudio “Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011” (Briceño & Carreras , 2013), es importante tener en los primeros pisos, muros con espesores de 150 a 200 mm, de forma que se puedan tener núcleos confinados con estribos en los extremos de cada uno de los muros y poco a poco ir reduciendo los espesores hacia los últimos pisos, en donde los esfuerzos causados por los sismos son menores.

Referencias Bibliográficas

ACI 318-19. (2019). *Building code requirements for structural concrete: ACI 318R–19*. S,d: requirements for structural concrete.

ACI 318S-14. (S,f). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-14*. S,d: ACI 318S-14.

ACI 318SUS-14. (S,f). *Requisito de reglamento para concreto estructural* . S,d: American Concrete Institute.

ACI. (s,f). *Claves de Transición: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural* . S,d: American Concrete Insititute.

Academia Edu. (20 de septiembre de 2019). *Descripción de los Sistemas Constructivos más Utilizados para la Construcción de vision en Colombia*. Obtenido de Descripción de los Sistemas Constructivos más Utilizados para la Construcción de vision en Colombia: https://www.academia.edu/7622485/3._DESCRIPCION_DE_LOS_SISTEMAS_CONSTRUCTIVOS_MAS_UTILIZADOS_PARA_LA_CONSTRUCCION_DE_VISION_EN_COLOMBIA

Aguilar, R. (2007) *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte, Monografías de ingeniería sísmica. Barcelona, España.*

Alcocer, S. (1995). *Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado muros estructurales*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres .

Alzate, A, Arenas, C. (2014). *Proceso de Diseño Para Edificaciones de Concreto Reforzado de 1 a 5 Pisos, en el Municipios de Pereira, Basado en la ACI 318-02*, Universidad Libre Seccional

Pereira.

Andrade, L. (2004). *Control de la deriva en las normas de diseño sismoresistente*. Perú:

Pontificia Universidad Católica del Perú

Arthur, N.(2001). *Diseño de Estructuras de concreto*. Bogotá D.C.

Arteta, C. (2018). *Alternativas de Rigidizacion en Edificios Altos en Concreto para la Zona de Amenaza Sísmica Baja en la Costa Caribe Colombiana*, Trabajo de investigación para optar al título de Magister en ingeniera Civil con énfasis en Ingeniería Estructural, Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia.

Bartolomé , A., & Ríos, R. (S,f). *comportamiento a fuerza cortante de muros delgados de concreto reforzados en su zona central con barras de acero, fibra de polipropileno y con fibra de acero*. Lima, Perú: Departamento de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Blandon, A., Arteta, c., Bonett, R., Carrillo, J., Bayer, K., & Almeida, P. (2018). *Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading*,. S,d: Engineering Structures.

Blasco, A. (2004). *Los edificios de muros delgados de concreto y las nuevas normas para su diseño*. S,d: consejo directivo nacional de SENCICO.

Fernandez, H. (2010). *Comportamiento sismico de edificios con muros delgados de hormigon aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú*. Barcelona : S,d.

Velez, J., & Riveros , C. (2018). *Capacidad de disipación de energía de muros delgados de concreto reforzado*. Lima, Perú: jornada sudamericanas de ingeniería .

Vielma, J., Barbat, H., & Oller , S. (2007). *Factores de reducción de respuesta en la norma NCSE-02 y el Eurocódigo 8* . Girona: Asociación Española de Ingeniería Sísmica.

Academia Edu. (20 de septiembre de 2019). *Descripción de los Sistemas Constructivos más*

Utilizados para la Construcción de vision en Colombia. Obtenido de Descripción de los Sistemas Constructivos más Utilizados para la Construcción de vision en Colombia:

https://www.academia.edu/7622485/3._DESCRIPCION_DE_LOS_SISTEMAS_CONSTRUCTIVOS_MAS_UTILIZADOS_PARA_LA_CONSTRUCCION_DE_VISION_EN_COLOMBIA

ACI 318-19. (2019). *Building code requirements for structural concrete: ACI 318R–19*. S,d: requirements for structural concrete.

ACI 318S-14. (S,f). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-14*. S,d: ACI 318S-14.

ACI 318SUS-14. (S,f). *Requisito de reglamento para concreto estructural* . S,d: American Concrete Institute.

ACI. (s,f). *Claves de Transición: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural* . S,d: American Concrete Insititute.

Alcocer, S. (1995). *Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado muros estructurales*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres .

Andrade, L. (2004). *Control de la deriva en las normas de diseño sismoresistente*. Perú: Pontificia Universidad Catolica del Perú.

Belen , B., & Cabañas, L. (1999). *Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica*. S,d: ISSN 0214-4557.

Blasco, A. (2004). *SENCICO Foro sobre edificaciones de muros delgados de concreto armado, Estructurcion, criterios de diseño y particularidades del sistema de muros delgados de concreto armado*., S,d: S,d.

Blue Radio. (12 de Agosto de 2019). *Población colombiana esta ubicada en zona de riesgo de*

terremotos. Obtenido de Población colombiana esta ubicada en zona de riesgo de terremotos: <https://www.bluradio.com/nacion/el-87-de-la-poblacion-colombiana-esta-ubicada-en-zona-de-riesgo-de-terremotos-154210>.

Briceño, A., & Carerras, N. (2013). *Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011*. Caracas, Venezuela: Univeridad Catolica Andres Bello.

Calculo civil: calculo de estructuras. (20 de enero de 2020). *EC2: Áreas mínimas y máximas de armadura*. Obtenido de EC2: Áreas mínimas y máximas de armadura: https://calculocivil.com/es/ec2/armado_minimo/base

E.030 Norma Técnica de Diseño Sismo Resistente . (S,f). *Norma Técnica de Diseño Sismo Resistente* . Perú: Normatividad Peruana .

E.030 Norma Técnica . (S,f). *Diseño Sismo Resistente (Normatividad Peruana) – ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, Artículo 16, Sección 16.1.*,. Perú: Normatividad Peruana.

E30, N. T. (2013). *Ministerio de Vivienda, Construcción y Sanamiento*. Lima. Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Sanamiento.

Gobierno de España. (20 de Octubre de 2019). *El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*. Obtenido de El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: <https://www.mitma.gob.es/vivienda>

Klingner, R. (2007). *Diseño unificado de muros por desplazamientos, 20mo Simposio nacional en prevención de desastres*. Austin, Texas: Universidad de Texas .

Norma venezolana 1753 . (2006). *Proyecto y construcción de obras en concreto estructural*. Caracas, Venezuela: Norma venezolana 1753 – 2006.

NSR-10 . (S,f). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Bogotá: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.

NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. (S,f). *NSR-10*. Bogotá: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.

Vélez , J., Blandón, C., Bonett, R., Arteta, C., & Carrillo , J. (2004). *Ensayos cuasi-estáticos cíclicos de muros delgados de concreto reforzado en edificios colombianos*. S,d: S,d.

Vélez, C., Blandón, C., Bonett , R., Arteta , C., Almeida , J., & Beyer, K. (20 de Octubre de 2017). *Ensayos cuasi-estáticos cíclicos de muros delgados de concreto reforzado en edificios colombianos*. Obtenido de Ensayos cuasi-estáticos cíclicos de muros delgados de concreto reforzado en edificios colombianos:

https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A212252/datastream%20m/PDF_01/view

w