

Evolución Normativa para el Diseño Sismo Resistente de Edificaciones en Muros de Concreto
Reforzado de Baja Altura

Hugo Rodrigo Verjel Sánchez

Trabajo de grado para optar el Título de Especialista en Estructuras

Director:

Alvaro Viviescas Jaimes

Ing. Civil – Ph. D.

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

Dedicatoria

A Dios, mi creador benevolente

A mi madre, hijos, hermanos, y familiares

A mi esposa Neydi, por su constante e incondicional amor.

Agradecimientos

A mi director, profesores y compañeros de Clase.

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Evolución normativa para el diseño sismo resistente de edificaciones en muros de concreto reforzado de baja altura en Colombia	15
2.1 Antecedentes	15
2.1.1 Características generales de los muros estructurales	16
2.2 Alcance de los reglamentos	18
2.3 Evolución de los requisitos normativos que involucran el sistema de muros de concreto	19
2.3.1 Espectro elástico de diseño.	20
2.3.2 Coeficiente de importancia I.....	23
2.3.3 Zonas de amenaza sísmica	25
2.3.4 Módulo de elasticidad	29
2.3.5 Evolución de la capacidad de disipación de energía básico	30
2.3.6 Evolución de los límites de la deriva	37
2.3.7 Evolución de los requisitos de resistencia y funcionamiento	38
2.3.8 Resistencia de diseño	41
2.3.9 Flexión y cargas axiales	43
2.3.10 Principios y requisitos generales (C.10.3)	43
2.3.11 Cortante.....	44
2.3.12 Evolución de la Resistencia al cortante proporcionada por el concreto en elementos no presforzados	45

2.3.13 Evolución de las Disposiciones especiales para muros	45
2.4 Evolución del refuerzo mínimo en muros (C.14).	48
2.4.1 Refuerzo mínimo C.14.3.....	49
2.5 Capítulo C.21 Evolución de los Requisitos de diseño sismo resistente.....	52
2.5.1 Capítulo C.21 Requisitos de diseño sismo resistente NSR-98	52
2.5.2 Capítulo C.21 Requisitos de diseño sismo resistente NSR-10	53
2.6 Diagrama secuencial del diseño de muros de concreto, basado en la norma vigente NSR-10.	56
3. Análisis evolutivo de las normas y consideraciones a futuro.	62
3.1 Microzonificación.....	63
3.2 Arquitectura de las edificaciones de muros	63
3.3 Espesores mínimos de muros.....	64
3.4 Mallas electrosoldadas.....	66
3.5 Elementos de borde.....	66
4. Análisis	68
5. Conclusiones.....	71
Referencias Bibliográficas	73

Lista de figuras

Figura 1. Edificaciones de baja altura en muros de concreto, Adaptado de (Herrera 2014)	15
Figura 2. Espectro elástico de diseño NSR-98. Adaptado de (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., 1998)	20
Figura 3. Espectro elástico de diseño NSR-10. (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).....	22
Figura 4. Mapa de zonas de amenaza sísmica en Colombia NSR-98. Adaptado de (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1998)	26
Figura 5. Mapa de zonas de amenaza sísmica en Colombia NSR-10. Adaptado de (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)	27
Figura 6. Dimensiones en muros y Valor de “d”	47
Figura 7. Refuerzo para muros con espesores mayores o iguales a 250 mm.....	50
Figura 8. Espaciamiento del refuerzo.	51
Figura 9. Procedimiento de análisis en el diseño de muros de concreto.....	60
Figura 10. Fase 2 diagrama de flujo. Procedimiento de análisis diseño de muros de concreto....	58
Figura 11. Diseño del refuerzo vertical de Muros de Concreto reforzado.....	59

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación pesos, sistema pórticos Vs sistema de muros	17
Tabla 2. Evolución de los coeficientes de los espectros en las normatividades	21
Tabla 3. Evolución del parámetro I, coeficiente de Importancia	24
Tabla 4. Evolución de los parámetros Aa y Av en las capitales de Colombia	30
Tabla 5. Evolución de las fórmulas para el cálculo de Ec.	29
Tabla 6. Valores de R código Colombiano de construcciones sismoresistentes CCCSR 84	30
Tabla 7. Valores de Ro. NSR-98	31
Tabla 8. Valores de Ro. NSR-10.	33
Tabla 9. Evolución del valor de R para estructuras irregulares	35
Tabla 10. Cambios en los valores de Ro	35
Tabla 11. Cambio de alturas permitidas	36
Tabla 12. Derivas máximas como porcentaje de hpi	37
Tabla 13. Φ para secciones a tracción.	41
Tabla 14. Factor Φ para secciones a compresión.	41
Tabla 15. Factor Φ para otros elementos reforzados.	41
Tabla 16. Factor Φ para cortante y torsión.	42
Tabla 17. Valores del factor β_1	43
Tabla 18. Cuantías mínimas para refuerzo vertical en muros de concreto	49
Tabla 19. Cuantías mínimas para refuerzo horizontal en muros de concreto	49
Tabla 20. Resistencia nominal del concreto en los elementos del sistema de resistencia sísmica	52

RESUMEN

TÍTULO: EVOLUCIÓN NORMATIVA PARA EL DISEÑO SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES EN MUROS DE CONCRETO REFORZADO DE BAJA ALTURA ¹

AUTORES: HUGO RODRIGO VERJEL SÁNCHEZ²

PALABRAS CLAVE: Normativas de Construcción, Colombia, Reglamento NSR-10, Reglamentación Sismo Resistente, Reglamento NSR-98. Muros portantes.

DESCRIPCIÓN:

El conflicto armado y los problemas sociales han originado un desplazamiento constante de los habitantes del sector rural hacia los centros poblados de las distintas zonas sísmicas en Colombia, el gobierno y los constructores optan por desarrollar edificaciones de baja altura que además de ofrecer economía y rapidez en su construcción, presenten un buen desempeño y comportamiento sísmico. debido a esta problemática, los sistemas de muros de concreto aplican como una alternativa eficiente, para eso el ministerio de vivienda y la asociación de ingeniería sísmica (AIS) han venido implementando una serie de requisitos que nacen desde el año 1984 con la aplicación del decreto 1400 denominado código colombiano de construcciones sismo resistentes CCCSR-84, este código ha sufrido modificaciones que han sido consignadas en las actualizaciones de los años 1998 y 2010, hoy a puertas de una nueva normativa, se analiza cómo ha sido la evolución de los requisitos sísmicos en edificaciones de muros de concreto reforzado, y que implicación ha tenido en aspectos como el espesor de los muros, la aplicación de los elementos de borde, el uso de mallas electro soldadas, la ductilidad aportada, las aberturas en los muros etc. Donde se identifican las falencias y aciertos, en las normativas y requisitos que deben ser tenidos en cuenta en los diseños de edificaciones de muros de concreto reforzado según la evolución de las nuevas normativas.

¹ Trabajo de Grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph.D. Alvaro Viviescas Jaimes

ABSTRACT

TITLE: NORMATIVE EVOLUTION FOR THE DESIGN RESISTANT SISM OF BUILDINGS IN REINFORCED CONCRETE WALLS OF LOW HEIGHT¹

AUTHORS: HUGO RODRIGO VERJEL SÁNCHEZ²

KEYWORDS: Construction Regulations, Colombia, Regulation NSR-10, Regulation Earthquake Resistant, Regulation NSR-10, Bearing walls.

DESCRIPTION:

The armed conflict and social problems have caused a constant displacement of the inhabitants of the rural sector towards the populated centers of the different seismic zones in Colombia, the government and the builders choose to develop low-rise buildings that in addition to offering economy and speed in its construction, present a good performance and seismic behavior. Concrete wall systems apply as an efficient alternative, for that the Ministry of Housing and the Association of Seismic Engineering (AIS) have been implementing a series of requirements that have been born since 1984 with the application of Decree 1400 called the Colombian Code of earthquake resistant construction CCCSR-84, this code has undergone modifications that have been recorded in the updates of the years 1998 and 2010, today at the doors of a new regulation, it is analyzed how the evolution of the seismic requirements in building of walls of reinforced concrete, and what involvement has had in aspects such as the thickness of the walls, the application of the edge elements, the use of electro-welded meshes, the ductility provided, the openings in the walls etc. Failures and successes are identified, in subjects and requirements that must be taken into account for the construction of reinforced concrete walls in the evolution of the new regulations.

¹ Trabajo de Grado.

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ph.D. Alvaro Viviescas Jaimes

Introducción

Con la publicación de una versión de Requisitos de fuerza lateral recomendados y comentarios realizada en el año 1974 por la asociación de Ingenieros estructurales de California (SEAOC) y traducida al español por el Ingeniero Civil Luis E. García y el profesor Sarria (García, 2014); se comienza a vislumbrar la posibilidad de crear una norma de construcción de estructuras en Colombia. En el año 1978 el consejo de tecnología Aplicada (ATC), publicó un documento traducido llamado (ATC-3); el cual fue adaptado al contexto nacional con algunas normas de construcción primordialmente del Instituto Americano del Concreto (Cotes Rincones & Hoyos Luna, 2016).

En el año 1975 nace la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) y cuatro años después (1979), esta asociación financia el trabajo para redactar en limpio, las traducciones de Sarria y García; quienes con el apoyo de varios profesionales entre los que se destacan Nathan Newark, el Ingeniero académico condecorado en sismos Profesor Meten Sozen; elaboraron la norma (AIS 100-81) y se logró construir el primer mapa de zonificación sísmica en Colombia (Andes, 2017).

El 31 de marzo de 1983 ocurre en la ciudad de Popayán un temblor de magnitud 5.5 grados en la escala de Richter que dejó a la ciudad semidestruida y que alertó a la Ingeniería Colombiana en la necesidad de crear una normativa con los requisitos necesarios para la construcción de edificaciones más seguras que las que actualmente existían (Aranguren Sedano, 2011).

El mandatario del país, Dr. Belisario Betancur Cuartas, designa al Profesor Sarria como representante suyo en Popayán, encargándolo para evaluar los daños y sus implicaciones en la reconstrucción de la ciudad; así como al ministro de obras Públicas Hernán Beltz para que reúna

a los expertos de esa época, quienes elaboraron el primer libro normativo en sismos, denominado Código Colombiano de Construcciones Sismo resistentes, decreto 1400 del 7 de junio de 1984. Este código tuvo una vigencia de 14 años y fue reemplazado por el Reglamento de construcción sismo resistente NSR-98, el cual registró una validez de doce (12) años y al que se le hizo una nueva actualización que fue expedida en el año 2010, que está vigente y se conoce como NSR-10 (Cotes Rincones & Hoyos Luna, 2016).

Con el aumento de la construcción de viviendas de poca altura en el país y verificando que, en la mayoría de poblaciones de las distintas zonas sísmicas de Colombia, optan por la elaboración de proyectos de edificaciones que no superan los cuatro o cinco pisos de altura (Camacol, 2011) conociendo el primer código y sus actualizaciones posteriores, se realiza un análisis de la evolución normativa de diseño sismo resistente en edificaciones con muros en concreto reforzado de baja altura (menores de cinco pisos) en nuestro país.

Algunas investigaciones (García, 2014) han desarrollado ecuaciones basadas en modelos experimentales, que han servido para mejorar la respuesta sísmica de los muros de concreto reforzado, identificando cuáles son las fallencias o los mecanismos de fallas más representativos y comunes de este sistema de edificaciones.

Mediante un compendio de criterio normativo, se hace referencia a las normas que presentan similitudes, evaluando que tanto se han alterado las variables en el proceso de cálculo de los edificios de muros de concreto de acuerdo a la normatividad vigente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Analizar la evolución de los requisitos de diseño de muros en concreto reforzado, implementados en construcciones de baja altura y consignados en las diferentes normas de diseño colombianas.

1.2 Objetivos específicos

✓ Revisar los cambios que han tenido las variables y coeficientes de las ecuaciones utilizadas en el diseño de muros en concreto reforzado, en el primer reglamento y las actualizaciones posteriores.

✓ Analizar las implicaciones técnicas originadas por las modificaciones de las reglamentaciones en la construcción de edificaciones con muros.

✓ Identificar si la normatividad actual, requiere ajustes que mejoren la respuesta sísmica de los muros de concreto y de las falencias típicas de este sistema estructural.

2. Evolución normativa para el diseño sismo resistente de edificaciones en muros de concreto reforzado de baja altura en Colombia

2.1 Antecedentes

Colombia es uno de los países latinoamericanos que ha mostrado un mayor crecimiento en las cifras de construcción de edificaciones de muros de concreto de baja altura (Camacol, 2011), implementado el sistema de muros en viviendas de interés social (VIS), en las cuales, la arquitectura contempla la construcción de muchos espacios habitacionales. En su diseño se debe garantizar el cumplimiento de los requisitos mínimos estipulados por los reglamentos de construcción sismo resistente, aplicados a muros de concreto reforzado.



Figura 1. Edificaciones de baja altura en muros de concreto, Fuente: (Herrera, 2014)

Según Carrillo & Alcocer, (2013) estas edificaciones poseen buena resistencia y gran rigidez lateral, lo que hace que los desplazamientos sean bajos, comparados con el permitido por la norma NSR-10, del 1% de la altura de piso. Por otro lado, en los muros se están usando concretos con resistencias a la compresión entre un 20 y 25% menos de la utilizada en Colombia y regulada mediante la norma técnica colombiana NTC 673 (Cotes Rincones & Hoyos Luna, 2016), debido al bajo nivel de respuesta sísmica, así como espesores de 100 mm con cuantías mínimas reglamentadas en las normas de diseño. En las zonas de amenaza sísmica intermedia y baja, para edificaciones se encuentra que la mayoría de los elementos estructurales están diseñadas con dimensiones y cuantías mínimas de refuerzo.

2.1.1 Características generales de los muros estructurales. Los muros estructurales, son sistemas cuyas características considerables de rigidez le brindan un buen comportamiento para resistir cargas sísmicas laterales y, por lo tanto, brindan una reducción en los desplazamientos. Otro de los aspectos relevantes, es la rapidez con que se construyen estas estructuras, pues se utilizan encofrados como el tipo túnel; que permite vaciar hasta un piso o nivel por día **(Encofrados, 2019)**.

El muro es representado en su comportamiento como una viga en voladizo empotrada cuya deformación es dominada por flexión, por eso es importante que el sistema disponga de una simetría en planta que evite problemas de torsión originados por el cambio de rigidez (Rochel, 2012).

La presencia de aberturas o vanos en los muros pueden producir efectos negativos en el sistema estructural por las diferentes irregularidades que puede causar, perturbando así la respuesta sísmica de la edificación. La adecuada colocación del refuerzo en los muros puede hacer que se logren

mejores resultados (Casabonne, 2001) en especial cuando se desea que dicho refuerzo obtenga un buen comportamiento en el rango inelástico.

El uso de elementos de borde, con una disposición especial del acero que brinda confinamiento y un ligero aumento en la sección en los extremos del muro, igualmente, la inclusión de mallas electro soldadas como acero de refuerzo, hace que los muros estructurales se consideren como un sistema con características muy particulares en su comportamiento estructural (Briceño & Carreras, 2013).

Tabla 1. Comparación pesos, sistema pórticos vs sistema de muros

Sistema de pórticos	Elemento	Sistema de muros
24.00 k/m ²	Losa	8.00 k/ m ²
10.00 Kg/m ²	Columnas	0.00 Kg/m ²
0.00 Kg/m ²	Muros	16.50 Kg/m ²
Total 34.00 Kg/m ²		Total 24.50Kg/m ²

Fuente: (Aycardi,2010)

Las estructuras de muros portantes son menos pesadas que las construidas con sistema de pórticos, o como sistema dual, lo que las hace más económicas, además la rapidez con que se construyen por el uso de formaletas hace que el costo de la mano de obra sea menor. Según Aycardi

(2010) el peso puede tener una disminución entre el 70 y el 85 % comparado con el peso de la edificación, construida con otros sistemas estructurales.

Los edificios de muros portantes por su naturaleza poseen una rigidez que depende del material utilizado por los ingenieros estructurales y de la geometría que está condicionada por los arquitectos o diseñadores. Una estructura con una proyección arquitectónica que no sea adecuada, puede originar que no se obtenga la suficiente rigidez, para limitar las deformaciones que se puedan presentar. Precisamente uno de los objetivos del código colombiano en cuanto al diseño estructural de edificaciones, es limitar las deformaciones (derivadas) a un cierto porcentaje de la altura de pisos.

2.2 Alcance de los reglamentos

Las edificaciones construidas después del sismo de Popayán y de la entrada en vigencia del código colombiano de construcciones sismo-resistentes (MOP, 1984) debían construirse con los requisitos mínimos para diseño establecido en esa normatividad. Con la actualización de las normas, no se quiso pretender que las construcciones ya edificadas se debían reforzar o que una construcción realizada antes de la NSR-10 pueda sufrir daños o colapso por haberse evaluado con la NSR-98, por lo tanto, lo que se busca en las actualizaciones es ajustar con mejores resultados aquellos requisitos que presentaban falencias en el diseño de los elementos que componen las estructuras para garantizar mejor su funcionamiento ante las acciones sísmicas (García, 2014).

El alcance como lo consignan las normativas se basa en la reducción de pérdida de vidas ante las acciones sísmicas, evitando deterioro patrimonial para el estado y sus habitantes. En general las edificaciones, incluidos los edificios de muros portantes de baja altura, deben cumplir con lo

prescrito en los reglamentos desde el 84 hasta el día de hoy, para eso se establece que las edificaciones cumplan los siguientes requerimientos:

- Resistir cargas de uso (cotidianas).
- Resistir temblores de poca intensidad de daño.
- Resistir temblores moderados posiblemente con daños no estructurales, pero sin daño estructural.

En las normas no se define o se cuantifica lo que es un sismo de poca intensidad, un temblor moderado o un movimiento fuerte, pero si obligan a que, ante un evento sísmico la edificación no colapse ni se generen pérdida de vidas.

Los ingenieros estructurales diseñan para un evento sísmico que tiene un periodo de retorno de 475 años, o un sismo que tiene la probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, es decir que, si en los próximos 50 años sucedieran 1000 eventos sísmicos, 100 de ellos es posible que sean más fuertes que el sismo para el cual se diseña (Casabonne, 2001).

2.3 Evolución de los requisitos normativos que involucran el sistema de muros de concreto

Para realizar la comparación de las normatividades reglamentadas hasta el día de hoy, se extraen y evalúan solamente aquellas normas que corresponden específicamente al sistema de muros portantes, transcribiendo lo redactado en cada párrafo, capítulo o sección, comenzando desde el código del 84 y finalizando con la NSR-10. Se analiza su evolución mediante un concepto del alcance de las modificaciones con argumentos en sus aciertos y las implicaciones que conllevan dichos cambios en la construcción de edificios de baja altura, objeto del presente documento.

2.3.1 Espectro elástico de diseño. Para el diseño de muros en concreto reforzado, se debe analizar al igual que en todos los sistemas de configuración estructural, el espectro elástico de diseño. En la figura 2 se representa el espectro actualizado en la norma NSR-98, donde se puede observar el uso de unos coeficientes de diseño sísmico, los cuales varían de acuerdo a la zona de amenaza sísmica en que se esté diseñando.

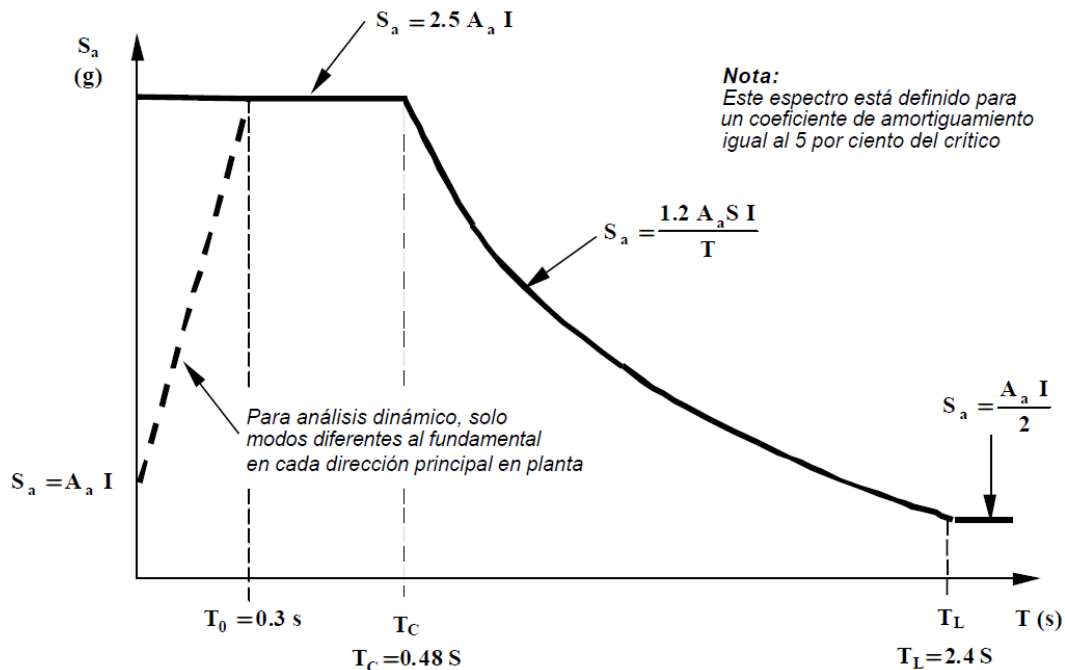


Figura 2. Espectro elástico de diseño NSR-98. Adaptado de (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., 1998)

Estos coeficientes son:

- A_a . = coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva en la roca
- A_v . = coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva en la roca
- F_a , F_v = coeficientes de sitio que son amplificaciones de la aceleración
- I = coeficiente de importancia
- S = Coeficiente de sitio de acuerdo al tipo de perfil de suelo, usado en las normas del 84 y 98
- T = periodo fundamental de la estructura.

La figura 3 referencia el espectro de diseño de la normativa NSR-10, su evolución con respecto a las anteriores se describe en la tabla 2.

Tabla 2. Evolución de los coeficientes de los espectros en las normatividades

Zona	NSR-98	NSR-10	Evolución normativa
Meseta superior	$S_a = 2.5 A_a I$	$S_a = 2.5 A_a F_a I$	Se incluye nuevamente el factor F_a coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio
Zona central caída del espectro	$S_a = \frac{1.2 A_a S I}{T}$	$S_a = \frac{1.2 A_v F_v I}{T}$	Se cambia el coeficiente de aceleración horizontal A_a por el factor A_v que es el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva y que existía desde la norma del 84. Se cambia S por F_v .
Zona inferior	$S_a = \frac{A_a I}{2}$	$S_a = \frac{1.2 A_v F_v T_L I}{T^2}$	En la norma del 98, el valor S_a (Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un período de vibración T) era constante, seguía una línea horizontal y se modificó en la NSR-10, haciéndola variable.

En el Código Colombiano NSR-84, el espectro de diseño estaba definido en términos de A_a y A_v , en la NSR-98 se había suprimido el parámetro A_v , debido a que los registros no eran suficientes para establecer la distinción entre los dos parámetros, con la puesta en marcha de la red

sismológica nacional, se triplicó el número de registros entre el año 1995 al año 2009, pasando de 11008 eventos a 33100 registrados, lo que hizo que la nueva norma NSR-10 volviera a formular el espectro con A_a y A_v , registrándose una descripción más acertada en la disminución de los efectos de las ondas sísmicas en Colombia, permitiendo a los diseñadores trabajar con datos más seguros y confiables.

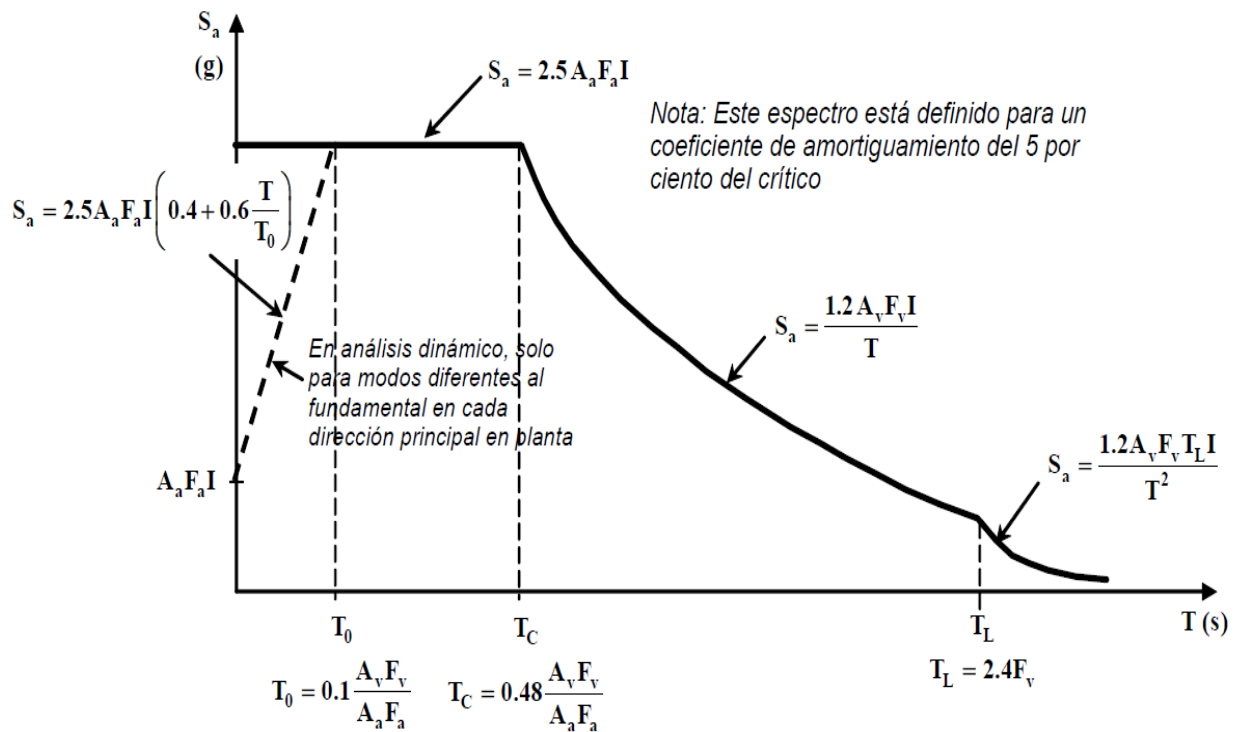


Figura 3. Espectro elástico de diseño NSR-10. (AIS, 2010).

2.3.2 Coeficiente de importancia I. De acuerdo al uso de las edificaciones, el coeficiente de importancia I, se dividió inicialmente en tres grupos, y las normativas siguientes ampliaron esos grupos a cuatro con la única diferencia de que la NSR-98, clasificó a los centros de enseñanza dentro del grupo II de edificaciones de atención a la comunidad, y hoy en día la NSR-10 los situó dentro del grupo III de edificaciones de atención a la comunidad. Los miembros de los entes encargados (sociedad colombiana de ingenieros SCI, AIS, Asociación Colombiana de ingeniería estructural ACIES y la asociación gremial de orden nacional CAMACOL) son los encargados de la actualización de la norma y clasificación de las edificaciones según el nivel de importancia, un ejemplo de ello fue la importancia que se brindó a los centros educativos dándoles una clasificación de uso más especial. El grupo IV se estableció para las edificaciones indispensables que debían seguir funcionando después del sismo tales como hospitales, aeropuertos, refugios, estaciones eléctricas, plantas de acueducto, depósitos de explosivos o agentes tóxicos y estructuras que formen parte de sistemas contra incendio.

El grupo III con edificaciones que brindan atención en salud y seguridad a la comunidad tales como, estaciones de bomberos, cuarteles militares, oficinas de atención de emergencias, oficinas con equipos para uso en desastres, y la inclusión de los centros educativos. El grupo II con estructuras de ocupación especial en cuenta el número de habitantes albergados. Por último, el grupo I que son todas las construcciones de normal ocupación cubiertas por el reglamento que no se incluyen en otros grupos. La tabla 3 describe cómo ha evolucionado cuantitativamente el coeficiente de importancia de acuerdo al grupo de uso.

Tabla 3. Evolución del parámetro I, coeficiente de Importancia

GRUPO	CCCSR-84	NSR-98	NSR-10	AUMENTO EN %
Edificaciones Indispensables IV	-	1.3	1.5	15.38%
Edificaciones de atención a la comunidad III	1.2	1.2	1.25	4.17%
Estructuras de ocupación especial II	1.1	1.1	1.1	0
Estructuras de ocupación normal I	1	1	1	0

Fuente: (Camacol, 2011)

Los valores de la tabla 3, aumentaron en los grupos III y IV, estos valores a diferencia de los factores de amplificación o de aceleración que son experimentales, se toman arbitrariamente y se refleja una cuantificación del grado de importancia que las edificaciones tienen en la sociedad, ciudad, país o en la comunidad donde estén construidas. El parámetro **I** afecta toda la curva del espectro y lo que hace es agregarle un porcentaje adicional aumentando o disminuyendo las aceleraciones de acuerdo al uso de la edificación. Todos estos cambios normativos, influyen notoriamente en un aumento de los costos de construcción y, por ende, en el valor final de las edificaciones, pero pretende generar edificaciones más seguras.

2.3.3 Zonas de amenaza sísmica. La amplia información de la ocurrencia de eventos sísmicos en Colombia, originó que el mapa de amenaza sísmica sufriera variaciones, y desde el CCCSR-84 se han distinguido tres clasificaciones de acuerdo a la amenaza por sismo, estas son; alta, media y baja; su clasificación se establece de acuerdo al valor de A_a y A_v , si dichos coeficientes son menores o iguales a 0.10 la zona sísmica es baja, si el valor de A_a y A_v son mayores de 0.10 y menores de 0.20, la zona sísmica es intermedia, si dichos valores son mayores que 0.20, la zona sísmica se considera de amenaza alta.

Al respecto de esta zonificación existen muchos intereses económicos en la ubicación de las capitales de los departamentos, si bien ciudades como Bogotá y Medellín fueron ubicadas en sectores sísmicos intermedios, se hubieran podido clasificar como zonas altas dada la cercanía a los eventos sísmicos de tales sectores (Bermúdez, Franco, & Martínez, 2002).

Todo cambio normativo debe ser minuciosamente estudiado por la intervención de múltiples factores, entre ellos el económico que juega un papel importante en la toma de estas decisiones por parte de los miembros encargados de las actualizaciones de las normatividades en el país, las cuales son finalmente aprobadas por el gobierno nacional.

En la figura 4 se muestra la evolución de estos factores, haciendo una comparación entre la NSR-98 y la NSR-10, capitales como la ciudad capital Yopal, departamento del Casanare; que en la norma del 98 fue clasificada dentro de la zona de amenaza sísmica intermedia, hoy en día se cambió a zona de amenaza sísmica alta, lo que origina que las nuevas construcciones que se ejecuten en su territorio sean más costosas por la necesidad del cumplimiento de requisitos más seguros en cuanto a sismo-resistencia.

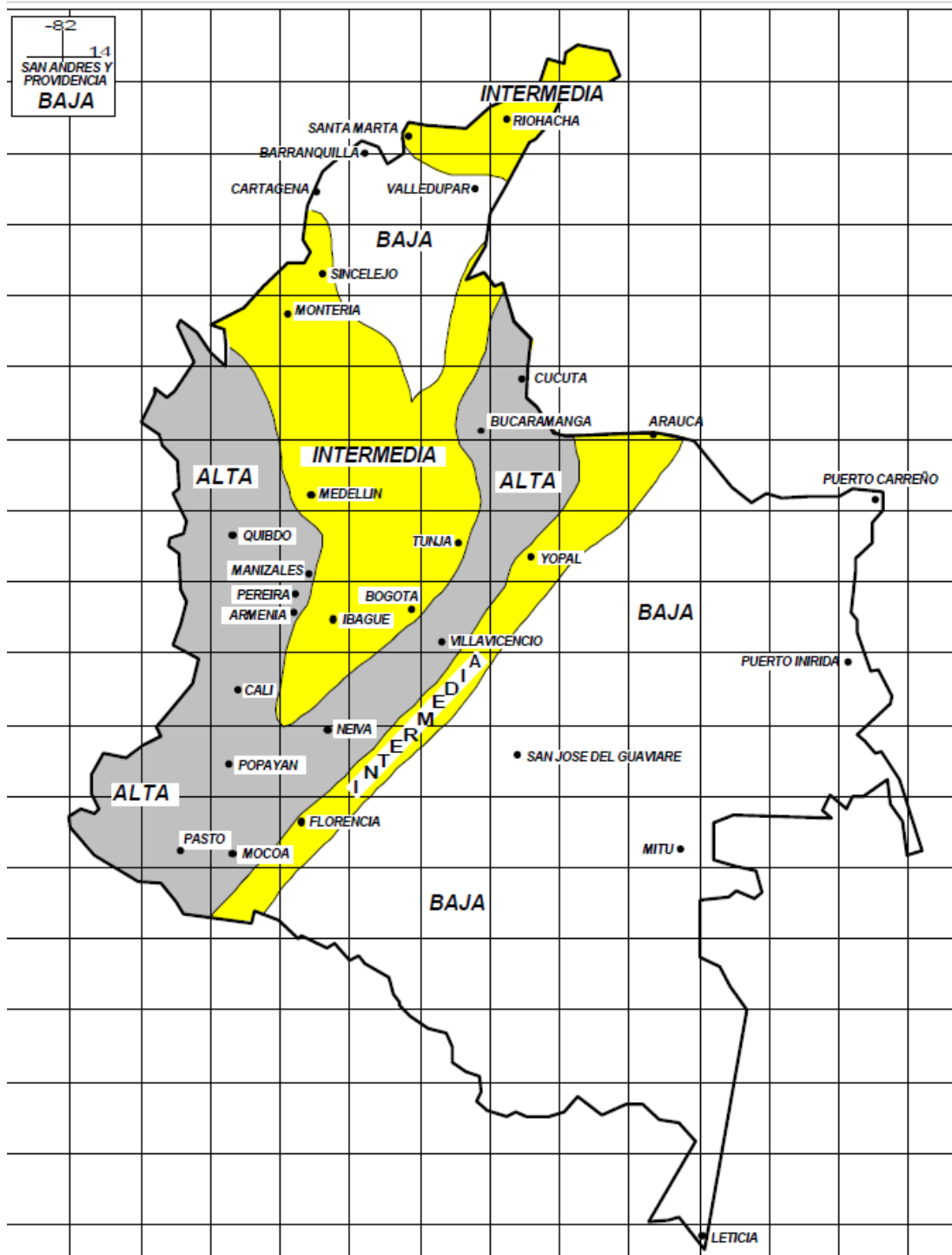


Figura 4. Mapa de zonas de amenaza sísmica en Colombia NSR-98. Adaptado de (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1998)

La figura 4 muestra un pico hacia abajo como zona intermedia entre las poblaciones de Cali, Neiva y Popayán. En la figura 5 este pico se elimina y todas esas poblaciones pasan de riesgo sísmico intermedio a alto, línea demarcada debajo de la población de Ibagué, capital del departamento del Tolima.

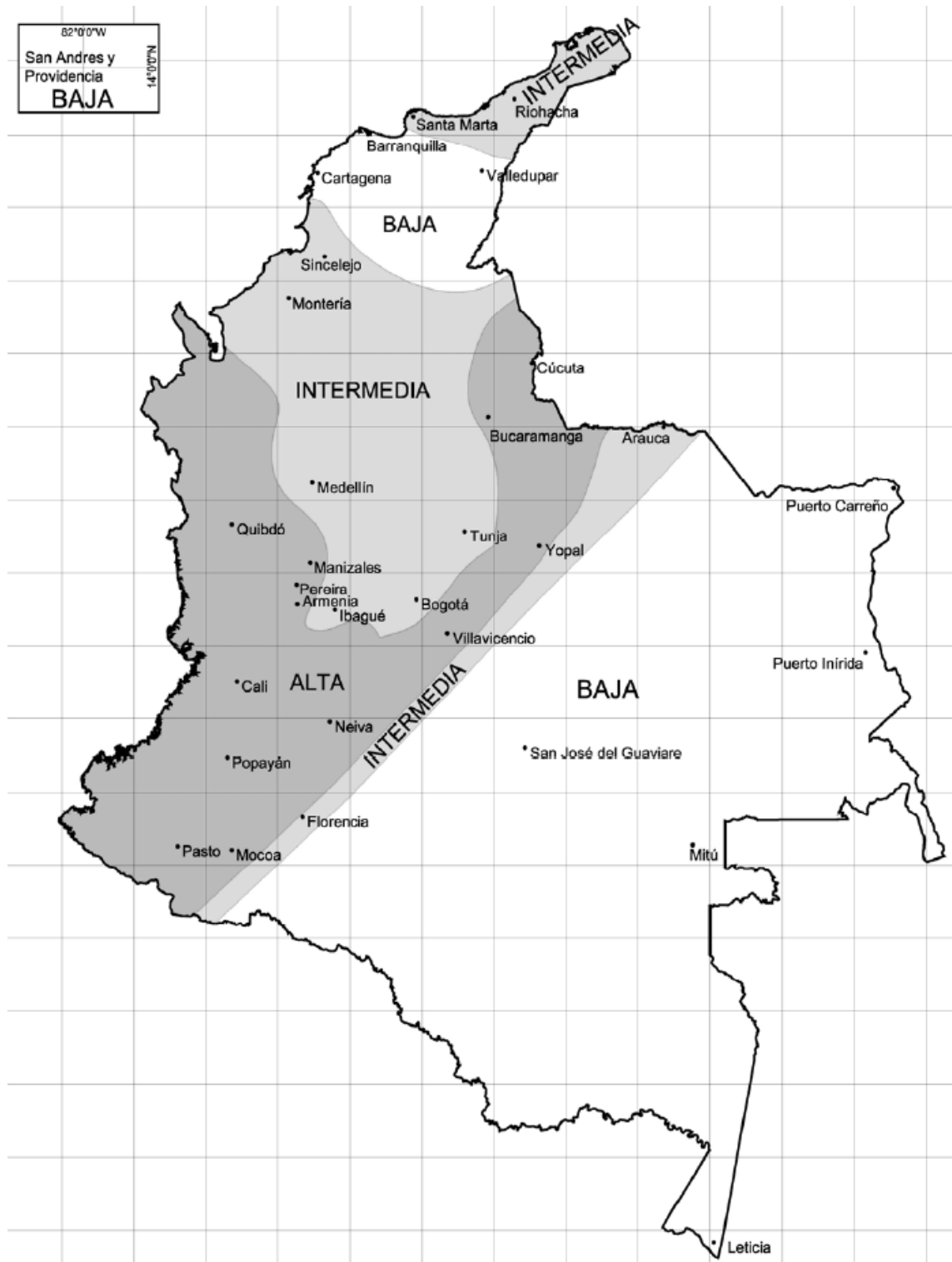


Figura 5. Mapa de zonas de amenaza sísmica en Colombia NSR-10. Adaptado de (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

Tabla 4. Evolución de los parámetros Aa y Av en las capitales de Colombia

Ciudad	Aa. NSR-10	Av. NSR-10	Zona de amenaza sísmica	Variación con respecto a las normas anteriores
Arauca	0.15	0.15	Intermedia	Sin cambios
Armenia	0.25	0.25	Alta	Sin cambios
Barranquilla	0.10	0.10	Baja	Sin cambios
Bogotá D. C.	0.15	0.20	Intermedia	Disminuyó Aa, de 0.20 a 0.15
Bucaramanga	0.25	0.25	Alta	Sin cambios
Cali	0.25	0.25	Alta	Sin cambios
Cartagena	0.10	0.10	Baja	Sin cambios
Cúcuta	0.35	0.30	Alta	Aumentó Aa, de 0.30 a 0.35
Florencia	0.20	0.15	Intermedia	Disminuye Av, de 0.20 a 0.15
Ibagué	0.20	0.20	Intermedia	Sin cambios
Leticia	0.05	0.05	Baja	Sin cambios
Manizales	0.25	0.25	Alta	Sin cambios
Medellín	0.15	0.20	Intermedia	Disminuye Aa, de 0.20 a 0.15
Mitú	0.05	0.05	Baja	Sin cambios
Mocoa	0.30	0.25	Alta	Sin cambios
Montería	0.10	0.15	Intermedia	Disminuye Aa, de 0.15 a 0.10
Neiva	0.25	0.25	Alta	Disminuye Aa, de 0.30 a 0.25 Disminuye Av., de 0.30 a 0.25
Pasto	0.25	0.25	Alta	Disminuye Aa, de 0.30 a 0.25 y Disminuye Av, de 0.30 a 0.25
Pereira	0.25	0.25	Alta	Sin cambios
Popayán	0.25	0.20	Alta	Disminuye Av, de 0.25 a 0.20
Puerto Carreño	0.05	0.05	Baja	Sin cambios
Puerto Inírida	0.05	0.05	Baja	Sin cambios

Quibdó	0.35	0.35	Alta	Aumentó Aa, de 0.30 a 0.35
Riohacha	0.10	0.15	Intermedia	Disminuye Aa, de 0.15 a 0.10
San Andrés, Isla	0.10	0.10	Baja	Sin cambios
Santa Marta	0.15	0.10	Intermedia	Disminuye Av, de 0.15 a 0.10
San José del Guaviare	0.05	0.05	Baja	Disminuye Aa, de 0.10 a 0.05 y Disminuye Av., de 0.10 a 0.05
Sincelejo	0.10	0.15	Intermedia	Disminuye Aa, de 0.15 a 0.10
Tunja	0.20	0.20	Intermedia	Sin cambios
Valledupar	0.10	0.10	Baja	Sin cambios
Villavicencio	0.35	0.30	Alta	Aumentó Aa, de 0.30 a 0.35
Yopal	0.30	0.20	Alta	Aumentó Aa, de 0.20 a 0.30

2.3.4 Módulo de elasticidad. El valor del módulo de elasticidad que se calcula a partir de la resistencia a la compresión del concreto, sin distinguir el tipo de agregado, fue modificada en la NSR-98 disminuyendo su valor de 13000 a 12500 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, luego la NSR-10 con la realización de nuevos estudios en los tipos de agregados (García, 2014); la volvió a aumentar; tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Evolución de las fórmulas para el cálculo de E_c .

Módulo de Elasticidad del concreto			Unidades
CCCSR-84	NSR-98	NSR-10	
$13000 \sqrt{f_c}$	$12500 \sqrt{f_c}$	$15100 \sqrt{f_c}$	Kgf/cm ²
$4000 \sqrt{f_c}$	$3900 \sqrt{f_c}$	$4700 \sqrt{f_c}$	MPa

Entre la NSR-198 y la NSR-10 el aumento del módulo de elasticidad es del orden del 20%, la investigación realizada entre norma y norma de los agregados existentes en Colombia (AIS, 2010)

y de los concretos que se manejan en las diferentes construcciones, hicieron que este valor se ajustara a lo especificado en la norma vigente, es decir un valor de $15100 \sqrt{f_c}$, cabe recordar que estos valores son directamente proporcional a la rigidez de la edificación y por lo tanto dichos cambios influyen notoriamente, aumentando los costos finales de construcción .

2.3.5 Evolución de la capacidad de disipación de energía básico. Las fuerzas de diseño que se colocan sobre la estructura se dividen por un coeficiente R de disipación de energía que garantizan un margen de seguridad, este valor se comenzó a usar desde la implementación de la norma del 84. Se debe evaluar el reforzamiento de las construcciones ejecutadas en el país antes del código del 84, pues estas fueron construidas sin el cumplimiento de una normatividad de ley. Este coeficiente se utiliza en la determinación de E (efectos sísmicos reducidos de diseño), donde $E=Fs/R$. Estas fuerzas sísmicas reducidas se usan en las combinaciones de carga para el diseño de los elementos.

El código colombiano de construcciones sismo-resistentes 84, estableció un valor del coeficiente de disipación de energía básico R, y no tuvo en cuenta valores por irregularidades de ninguna como se evidencia en la tabla 6, de esta manera:

Tabla 6. Valores de R código colombiano de construcciones sismo-resistentes CCCSR 84

a. Muros de Carga	CCCSR-84
a. Sistema vertical de resistencia sísmica	Valor R
b. Muros de concreto para zonas de riesgo sísmico alto	5.0
c. Muros de concreto para riesgo sísmico intermedio	4.0
d. Muros de concreto para riesgo sísmico bajo	4.0

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas, Colombia, 1984)

El artículo A.3.1.3 de la norma NSR-98, habla de la capacidad de disipación mínima requerida y en el capítulo A.2, presenta la tabla A.3.1, donde entrega un valor R_o y es el que determina la energía que se disipa en el rango inelástico por la estructura, de acuerdo a cada sistema de resistencia sísmico construido en el país. El valor de R en la tabla 6, no está multiplicado por ningún coeficiente de modificación por irregularidades.

Tabla 7. Valores de R_o . NSR-98

A. Sistema de muros de carga			Zona de amenazas sísmica					
Sistema de resistencia sísmica (fuerzas horizontales)	Sistema de resistencia sísmica (fuerzas verticales)	Valor R_o	Alta		Intermedia		Baja	
			Uso permit.	H máx	Uso permit.	H máx.	Uso permit.	H máx
2. Muros estructurales								
a. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DES)	El mismo	7	Si	72 m	Si	sin límite	Si	Sin límite
b. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DMO)	El mismo	5	No se permite		Si	72 m	Si	Sin límite
c. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DMI)	El mismo	2.5	No se permite		No se permite		Si	45 m.

Fuente: (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., 1998)

El valor de **R**, ha evolucionado y se ha modificado en las nuevas actualizaciones, este; depende de la capacidad de disipación de energía y del sistema estructural que se vaya a utilizar, independientemente de la zona de amenaza sísmica.

En la NSR-98 para obtener el coeficiente de modificación de respuesta **R**, se multiplica el coeficiente R_o por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación en altura Φ_a y en planta Φ_p . Las estructuras que presenten irregularidad por desigualdades asimétricas, por cambios en resistencia, así como en rigidez deberán utilizar los coeficientes Φ_a y Φ_p encargados de disminuir el coeficiente de capacidad de disipación de energía. Es claro que las estructuras clasificadas como regulares se comportan mejor que las estructuras irregulares cuando se exponen a la acción de eventos sísmicos (Briceño & Carreras, 2013).

- $R = R_o \cdot \Phi_a \cdot \Phi_p$
- Donde:
- R_o = coeficiente básico
- Φ_a = coeficiente de reducción por irregularidad en altura
- Φ_p = coeficiente de reducción por irregularidad en planta.

Todas las irregularidades obedecen a una concepción arquitectónica, por eso es muy necesario que en los proyectos se empleen equipos interdisciplinarios para que tanto el diseñador como el calculista estructural revisen el proyecto y en aras de lograr que la estructura tenga un buen comportamiento sísmico, realicen los ajustes necesarios para tener en cuenta dichas irregularidades. En la NSR-10, se introduce un nuevo coeficiente de ausencia de redundancia Φ_r :

Tabla 8. Valores de R_o . NSR-10.

A. Sistema de muros de carga				Zonas de amenaza sísmica						
Sistema de resistencia sísmica (fuerzas horizontales)	Sistema de resistencia sísmica (fuerzas horizontales)	Valor R_o (Nota 2)	Valor Ω_o (Nota 4)	Alt a	Intermedia	Baja	Uso permit	Altura máx.	Uso permit	Altura máx.
2. Muros estructurales										
a. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DES)	El mismo	5	2.5	Si	50 m	Si	Sin límite	Si	Sin límite	Sin límite
b. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DMO)	El mismo	4	2.5	No se permite		Si	50 m	Si	Sin límite	Sin límite
c. Muros de concreto con capacidad especial de disipación de energía (DMI)	El mismo	2.5	2.5	No se permite		No se permite		Si	50 m	50 m

Notas: Para edificaciones clasificadas como irregulares el valor de R_o debe multiplicarse por ϕ_a , ϕ_p y ϕ_r para obtener $R = \phi_a\phi_p\phi_rR_o$ (Véase A.3.3.3).

El valor de Ω_o puede reducirse restándole 0.5 en estructuras con diafragma flexible, pero no debe ser menos de 2.0 para cualquier estructura.

Fuente: (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

El valor de R ; debe multiplicarse por un nuevo factor como lo describe la nota 2, que se refiere a las edificaciones clasificadas como irregulares.

$$R = R_o \cdot \Phi_a \cdot \Phi_p \cdot \Phi_r \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- R_o = coeficiente básico.
- Φ_a = coeficiente de reducción por irregularidad en altura.
- Φ_p = coeficiente de reducción por irregularidad en planta.
- Φ_r = coeficiente de ausencia de redundancia.

En la norma actual, la NSR-10, presenta estos valores en la tabla A.3.1, y se introduce un coeficiente de reducción de la capacidad de disipación de energía de energía causado por ausencia de redundancia en el sistema de resistencia Sísmica Φ_r . como se muestra en la ecuación 1.

Dicho coeficiente de sobre-resistencia, se describe en la Sección A.3.3 de acuerdo a la estructuración en la forma de la edificación y por el Artículo A.3.3.9 así:

Uso del coeficiente de sobre resistencia Ω_o (A.3.3.9) — Si se diseñan los elementos frágiles o las conexiones de los elementos para las fuerzas sísmicas E , amplificadas por el coeficiente de sobre resistencia, Ω_o , éste se empleará de acuerdo a la siguiente ecuación para obtener las fuerzas de diseño:

$$E = (\Omega_o F_s / R) \pm 0.5 A_a F_a D \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde F_s . son las fuerzas sísmicas obtenidas del análisis, $R = \phi_a \phi_p \phi_r R_o$, y D es la carga muerta que actúa sobre el elemento tal como se define en el título B del Reglamento.

La no redundancia se obtiene cuando los elementos que resisten las fuerzas de sismo son pocos y es redundante si la resistencia sísmica es compartida entre muchos elementos. Según lo anterior, para redundante el $\Phi_r = 1$, para no redundante el $\Phi_r = 0.75$ es decir disminuye el valor de R .

El coeficiente de capacidad de disipación de energía básico R_o , varía entre 1 y 8. El mismo es una medida de la capacidad del sistema estructural de disipar energía en el rango inelástico, de su redundancia y de su sobre-resistencia, esta disipación de energía está relacionada con permitir daños en la edificación (Aycardi, 2010). Si los tres reglamentos, están permitiendo que haya daño en una estructura lo ideal es tener una estructura lo más redundante posible. El CCCSR del 84, no usó coeficientes de reducción por irregularidad y por sobre resistencia, contrario a la NSR-98, donde fueron incluidos, con un valor R_o igual a 7 para DES (disipación especial), un R_o igual a 5 para DMO (disipación moderada) y un valor R_o igual a 2.5 para DMI (disipación mínima). La NSR-10, disminuye estos valores para muros de concreto DES en dos unidades, es decir un R_o igual a 5 y para DMO lo baja un punto es decir un R_o igual a 4 como se puede apreciar en la tabla 8, normalizando el uso de un coeficiente de sobre resistencia igual a 2.5 para todos los casos.

Tabla 9. Evolución del valor de R para estructuras irregulares

	NSR-98	NSR-10
R	$R = R_o \cdot \Phi_a \cdot \Phi_p$	$R = R_o \cdot \Phi_a \cdot \Phi_p \cdot \Phi_r$

Comparando la NSR-98 y la NSR-10, estos cambios implican un incremento en el ($V_{\text{diseño}} = V_{\text{elástico}} / R$) y los cuantifica en términos de porcentaje así (Aycardi,2010):

Tabla 10. Cambios en los valores de R_o

NSR-98	NSR-10	Grado de disipación
7	5	DES
5	4	DMO

¿Que implica este cambio?			V diseño = V elástico/R
R = 7	NSR-98	V diseño = 0.14 R	Incremento del 42%
R = 5	NSR-10	V diseño = 0.20 R	
R = 5	NSR-98	V diseño = 0.20 R	Incremento del 25%
R = 4	NSR-10	V diseño = 0.25 R	

Fuente: (Aycardi,2010).

En la tabla 10, podemos observar que el aumento de la fuerza en el grado de disipación especial DES es de un 42%. En el sistema de muros de concreto tal vez este aumento no sea notorio debido a que esta fuerza se reparte entre muchos elementos o muros, esta es otra ventaja de construir edificaciones con este sistema; caso contrario por ejemplo le sucederá a un sistema aperticado donde esta fuerza será repartida entre pocos pórticos y los elementos tienen que elevar sus secciones para poder soportar los nuevos incrementos de carga.

En la tabla 11, se observa el cambio de alturas permitidas de las edificaciones de muros en concreto, La NSR-10 disminuyó la altura permitida en 22 metros y aumentó en la zona de riesgo sísmico bajo 5 metros con respecto a la norma NSR-98.

Tabla 11. Cambio de alturas permitidas

Alturas permitidas NSR-98	ZONAS RIESGO SÍSMICO		
	Alta	Intermedia	Baja

Muros de concreto (DES)	72 m.	Sin Limite	Sin Limite
Muros de concreto (DMO)	No se permite	72 m.	Sin Limite
Muros de concreto (DMI)	No se permite	No se permite	45 m
Alturas permitidas NSR-10	ZONAS RIESGO SÍSMICO		
	Alta	Intermedia	Baja
Muros de concreto (DES)	50 m.	Sin Limite	Sin Limite
Muros de concreto (DMO)	No se permite	50 m.	Sin Limite
Muros de concreto (DMI)	No se permite	No se permite	50 m.

2.3.6 Evolución de los límites de la deriva. Las derivas en el código colombiano de construcciones sismo resistentes de 1984, se establecieron de acuerdo al artículo A.6.4.2 Según el cual la deriva inelástica de diseño del piso no debía ser mayor al 1.5% de la altura de piso en consideración, en las siguientes normatividades, se redujo ese valor a 1.0% de hpi el cual es la altura de piso i, medida desde la superficie del diafragma de piso i hasta la superficie del diafragma del piso inmediatamente inferior, i-1 como se puede observar en la tabla 12, la deriva máxima para cualquier piso determinada de acuerdo con el procedimiento de A.6.3.1, no puede exceder los límites establecidos en la tabla A.6.4-1, en la cual, la deriva máxima se expresa como un porcentaje de la altura de piso hpi:

Tabla 12. Derivas máximas como porcentaje de hpi

Deriva máxima CCCSR-84	Deriva máxima NSR-98	Deriva máxima NSR-10
1,5% ($\Delta^i_{\max} \leq 0.015 \text{ hpi}$)	1,0% ($\Delta^i_{\max} \leq 0.010 \text{ hpi}$)	1,0% ($\Delta^i_{\max} \leq 0.010 \text{ hpi}$)

El cambio de 1.5% hpi a 1.0% hpi. Hizo que las estructuras se rigidizaran aún más, en las normas se establece que, si el valor calculado de la deriva es mayor que el límite del 1% de hpi, debe rigidizarse la estructura hasta que se cumpla con el límite especificado. El miedo a los daños que se puedan presentar por permitir mayor desplazamiento hizo que estos límites se redujeran, pero en su lugar los ingenieros se vieron condicionados a la construcción de estructuras de muros en concreto reforzado más costosas que con los requisitos de la CCCSR del 84 (Julian Carrillo, 2015).

Cuando se usan estructuras regulares, se introdujo en la sección A.6.3.1.3 del NSR-10 un procedimiento por el cual, se permite determinar la deriva máxima en los pisos superiores utilizando la deriva tangente. Es decir que ya no se tendrá que rigidizar las edificaciones donde en la construcción se emplee únicamente muros estructurales. Por último, Los valores límites de las derivas en la NSR-10 quedaron igual a los establecidos en la NSR-98.

2.3.7 Evolución de los requisitos de resistencia y funcionamiento. Los requisitos mencionados en esta sección corresponden a las combinaciones de mayoración de carga y los factores de reducción de resistencia utilizados para el diseño de elementos estructurales como los muros de concreto reforzado.

Resistencia requerida U: En general, los elementos de las estructuras serán diseñadas con resistencias mayores a las cargas mayoradas y para ello la norma del CCCSR-84, (Ministerio de Obras Públicas, Colombia, 1984), fijo las siguientes combinaciones:

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (\text{Ec. 3})$$

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.28W \quad (\text{Ec. 4})$$

$$U = 0.9D + 1.3W \quad (\text{Ec. 5})$$

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.0E \quad (\text{Ec. 6})$$

$$U = 0.9D + 1.0E \quad (\text{Ec. 7})$$

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H \quad (\text{Ec. 8})$$

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.05T \quad (\text{Ec. 9})$$

$$U = 1.4D + 1.4T \quad (\text{Ec. 10})$$

La Resistencia requerida en la norma NSR-98 (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sismica., 1998), utiliza las siguientes combinaciones:

$$U = 1.4D + 1.7L \quad (\text{Ec. 11})$$

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.28W \quad (\text{Ec. 12})$$

$$U = 0.9D + 1.3W \quad (\text{Ec. 13})$$

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.0E \quad (\text{Ec. 14})$$

$$U = 0.9D + 1.0E \quad (\text{Ec. 15})$$

$$U = 1.4D + 1.7L + 1.7H \quad (\text{Ec. 16})$$

$$U = 1.05D + 1.28L + 1.05T \quad (\text{Ec. 17})$$

$$U = 1.4D + 1.4T \quad (\text{Ec. 18})$$

La Resistencia requerida en la actualización NSR-10, normatizó las siguientes combinaciones:

$$U = 1.4D \quad (\text{Ec. 19})$$

$$U = 1.2D + 1.6L + 0.5 (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) \quad (\text{Ec. 20})$$

$$U = 1.2D + 1.6 (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) + 1.0 (L \text{ ó } 0.5W) \quad (\text{Ec. 21})$$

$$U = 1.2D + 1.0W + 1.0L + 0.5 (Lr \text{ ó } G \text{ ó } Le) \quad (\text{Ec. 22})$$

$$U = 1.2D + 1.0E + 1.0L \quad (\text{Ec. 23})$$

$$U = 0.9D + 1.0W \quad (\text{Ec. 24})$$

$$U = 0.9D + 1.0E \quad (\text{Ec. 25})$$

En la CCCSR-84 y la NSR-98; D es la carga muerta, L las cargas vivas, E son las cargas sísmicas reducidas de diseño ($E = F_s / R$), W es la carga de viento, T son fuerzas y efectos causados por contracción o expansión debida a cambios de temperatura, flujo plástico, retracción de fraguado, cambios de humedad, asentamientos diferenciales o combinación de estos efectos y H son las cargas debidas al empuje lateral del suelo o a presión hidrostática. En la NSR-10, Las combinaciones de carga son menores a las usadas en la NSR-98 y la CCCSR-84, la resistencia calculada es menor, compensando con un valor del coeficiente ϕ más bajo y que es utilizado para la reducción de resistencia.

B.2.4.1 — Aplicabilidad — Las combinaciones y los factores de carga que se dan en B.2.4.2 se usaran en todos los materiales estructurales permitidos por el reglamento de diseño del material, con excepción de aquellos casos en que el reglamento indique explícitamente que deba realizarse el diseño utilizando el método de los esfuerzos de trabajo, caso en el cual, se deben utilizar las combinaciones de la sección B.2.3.1.

Las combinaciones de carga dadas en B.2.4.2 contienen factores de carga menores que los reglamentados en la NSR-98, pero al mismo tiempo para cada uno de los materiales estructurales en la NSR-10 se han anulado valores de coeficientes de reducción de resistencia, ϕ , menores que los que consignados en el Reglamento NSR-98, siendo los nuevos valores relacionados con la probabilidad de falla estructural que limita el reglamento. Por lo tanto, es incorrecto, e inseguro, utilizar las nuevas ecuaciones de combinación de carga de B.2.4.2 con los valores de los coeficientes de reducción de resistencia, ϕ , que contenía la NSR-98.

2.3.8 Resistencia de diseño. En la sección C.9.3.1 de los 3 reglamentos se ha conservado y establece que la resistencia de diseño en términos de carga axial, cortantes, momentos y torsión es igual a la resistencia nominal multiplicada por un factor de reducción ϕ y debe ser mayor o igual a la resistencia requerida (U).

$$\text{Resistencia de diseño} = \phi \times \text{Resistencia Nominal} \geq \text{Resistencia requerida} = U \text{ (C.9-1)}$$

En la sección C.9.3.2.1 —Flexión sin carga axial, el factor de reducción de resistencia se mantiene para secciones controladas por tracción, como se define en 10.3.4. Para las normatividades se tiene:

Tabla 13. Φ para secciones a tracción.

Factor reducción de resistencia	CCCSR -84	NSR -98	NSR-10
Φ	0.90	0.90	0.90

En la sección C.9.3.2.2 — Secciones controladas por compresión, el factor de reducción de resistencia se mantiene como se definen en C.10.3.3: con refuerzo en espiral, para las normatividades es:

Tabla 14. Factor Φ para secciones a compresión.

Factor de reducción de resistencia	CCCSR - 84	NSR -98	NSR-10
Φ	0.75	0.75	0.75

Tabla 15. Factor Φ para otros elementos reforzados.

Factor de reducción de resistencia	CCCSR - 84	NSR -98	NSR-10
Φ	0.70	0.70	0.65

ϵ_t = deformación unitaria neta de tracción en el acero longitudinal extremo en tracción, en el estado de resistencia nominal, excluyendo las deformaciones unitarias causadas por presfuerzo efectivo, flujo plástico, retracción de fraguado, y variación de temperatura.

El valor de ϕ puede aumentar linealmente y hasta 0.90 cuando ϵ_t esté dentro de los límites de deformación unitaria en secciones controladas por compresión y por tracción, ϵ_t puede aumentar desde el límite de deformación unitaria a compresión hasta 0.005.

Para elementos en los cuales f_y no exceda 420 MPa, con refuerzo simétrico, y cuando $(d - d') / h$ no sea menor de 0.70, se permite aumentar ϕ linealmente hasta 0.90, en la medida que ϕP_n disminuye desde $0.10f_c A_g$ hasta cero. Para otros elementos reforzados ϕ puede incrementarse linealmente a 0.90 en la medida que ϕP_n disminuye desde $0.10f_c A_g$ o ϕP_b , el que sea menor hasta llegar a cero.

Tabla 16. Factor Φ para cortante y torsión.

Factor de reducción de resistencia	CCCSR - 84	NSR -98	NSR-10
Φ	0.85	0.85	0.75

En la norma vigente, el valor del factor se disminuyó en 0.1 y quedó cuantificado en un valor de 0.75.

2.3.9 Flexión y cargas axiales. A continuación, se resumen las disposiciones del capítulo C.10 de los Reglamentos, estas aplican al diseño de muros portantes de concreto reforzado sometidos a carga axial, flexión o a la combinación de estos:

Suposiciones de diseño (C.10.2) El valor de β_1 usado en la ecuación de cálculo de c/lw que es usado para relacionar la profundidad de bloque rectangular equivalente de esfuerzos de compresión con la profundidad del eje neutro β_1 , se determina según:

En la sección C.10.2.7.3 — Para $f'c$ entre 17 y 28 MPa, el factor β_1 se debe tomar como 0.85. Para $f'c$ superior a 28 MPa, β_1 se debe tomar en forma lineal a razón de 0.05 por cada 7 MPa de aumento sobre 28 MPa, sin embargo, β_1 no debe ser menor de 0.65.

Tabla 17. Valores del factor β_1 .

factor	Límites $f'c$	CCCSR – 84	NSR -98	NSR-10
β_1	17 Mpa - 28 Mpa	0.85	0.85	0.85
β_1	> 28 Mpa	Disminuir 0.05 por cada 7 Mpa de aumento		

En las tres normatividades el valor del factor se conserva, sin embargo, se especifica que β_1 no debe ser menor de 0.65.

2.3.10 Principios y requisitos generales (C.10.3). La resistencia axial de diseño ϕP_n de elementos en compresión se determina como lo consignan las normatividades en la siguiente sección:

Sección C.10.3.6.1 — Para elementos no presforzados con refuerzo en espiral que cumplan con los requisitos para espirales enunciados en la sección C.7.10.4, o para elementos compuestos que

cumplan con C.10.13 (requisitos para Elementos compuestos sometidos a compresión): En las tres normatividades el valor de ϕP_n se conserva.

$$\text{Para CCCSR-84 } \phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\text{Para NSR-98 } \phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (\text{Ec. 27})$$

$$\text{Para NSR-10 } \phi P_n = 0.80 \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (\text{Ec. 28})$$

2.3.11 Cortante. Los requisitos para Cortante y Torsión, enunciados en el Capítulo C.11 del Reglamento para el diseño y revisión de muros portantes en concreto reforzado sometidos a fuerza cortante se conservaron en las tres normas, dichos requisitos son los siguientes:

Resistencia al cortante (C.11.1) las normatividades CCCSR-84, NSR-98 y NSR-10 basan el diseño de secciones transversales sometido a cortante mediante la siguiente ecuación:

$$\phi V_n \geq V_u \quad (\text{Ec. 29})$$

V_u = fuerza cortante mayorada

V_n = resistencia nominal al cortante calculada mediante

$$V_n = V_s + V_c \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde **V_s** es la resistencia nominal al cortante proporcionada por el refuerzo de cortante y **V_c** es la resistencia nominal al cortante proporcionado por el concreto, calculada de acuerdo con C.11.2, C.11.3, o C.11.11 y con C.11.4, C.11.9.9 o C.11.11.

En la sección C.11.1.1.1 — Al determinar V_n , debe considerarse el efecto de cualquier abertura en los elementos.

2.3.12 Evolución de la Resistencia al cortante proporcionada por el concreto en elementos

no presforzados. En la sección C.11.2.1.2 — Para elementos sometidos a compresión axial:

- CCCSR-84 $V_c = 0.53\sqrt{f_c} (1 + (Nu/14Ag))$ (C.11.5) La cantidad Nu / Ag debe expresarse en kg/cm^2 .
- NSR-98, $V_c = 0.17 (1 + (Nu/14Ag)) \lambda\sqrt{f_c}.bw.$ (C.11.5) La cantidad Nu / Ag debe expresarse en MPa.
- NSR-10, $V_c = 0.17 (1 + (Nu/14Ag)) \lambda\sqrt{f_c}.bw.d$ (C.11.5) La cantidad Nu / Ag debe expresarse en MPa.

2.3.13 Evolución de las Disposiciones especiales para muros.

En este capítulo, la norma CCCSR-84 trata sobre el esfuerzo cortante total V_u , que para las demás actualizaciones NSR-98 y NSR-10, se enuncian como resistencia nominal a esfuerzos cortantes, dichos valores son:

Tabla 18. Resistencia nominal a esfuerzos cortantes en las diferentes normas.

CCCSR – 84	NSR -98	NSR-10
$2.7 \phi\sqrt{f_c}$	$5/6\sqrt{f_c}.h.d$	$5/6\sqrt{f_c}.h.d$

h = espesor del muro.

El valor de “ d ” para las 3 normatividades se sigue conservando en $0.8 L_w$ y puede ser mayor, es decir; que se tome a “ d ” como la distancia entre la fibra extrema a compresión y el centro de fuerza de todo el refuerzo a tensión.

En cuanto a la evolución normativa para el valor del esfuerzo cortante para muros sometidos a compresión:

Tabla 19. Esfuerzo cortante para muros sometidos a compresión en las diferentes normas.

CCCSR - 84	NSR -98	NSR-10
$V_c \leq 0.53\sqrt{f'_c}$	$V_c \leq 1/6\lambda\sqrt{f'_c}$	$V_c \leq 1/6\sqrt{f'_c}$

Donde el valor según la NSR-98 es:

$\lambda = 1.0$ para concreto normal,

$\lambda = 0.75$ para concreto liviano,

$\lambda \leq 0.85$ para otros concretos.

Se puede evidenciar que el valor del esfuerzo cortante se limitó y sufrió una disminución respecto al CCCSR-84 quedando establecida en $0.17\sqrt{f'_c}$, valor usado en las dos últimas actualizaciones.

El refuerzo a cortante para los muros se suministra, si $V_u > \phi V_c$ y el valor de dicho acero se calcula mediante la ecuación:

$$V_s = (A_v \cdot f_y) / S_2 \cdot h \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde A_v = Área de refuerzo a cortante horizontal en una distancia “ S_2 ”, y dicha distancia debe cumplir:

a) $S_2 \leq L_w/5$

b) $S_2 \leq 3 h$

c) $S_2 \leq 45$ centímetros para la normatividad CCCSR-84

$S_2 \leq 50$ centímetros para la normatividad NSR-98

$S_2 \leq 45$ centímetros para para la normatividad NSR-10

Parágrafo C.11.10.9.1 — La relación ρ_h de área de refuerzo a cortante horizontal a área bruta del concreto de la sección vertical no debe ser menor de **0.002**. En la figura 6, se aprecian las

dimensiones y el valor de “d” que se puede utilizar para los cálculos de las ecuaciones en los muros de concreto reforzado, de acuerdo a la NSR-10.

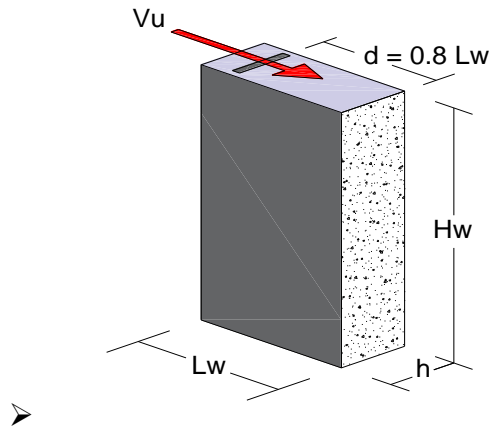


Figura 6. Dimensiones en muros y Valor de “d”

C.11.9.6 — V_c puede ser el menor de los valores calculados por medio de las ecuaciones (C.11-29) y (C.11-30).

$$\phi V_c \leq \phi * \left(0,27 * \sqrt{f'_c} * h * d + \frac{N_u * d}{4L_w} \right) \quad (\text{Ec. 32})$$

O

$$V_c = \left[0,005\lambda \sqrt{f'_c} + \frac{l_w \left(0,1\lambda \sqrt{f'_c} + 0,2 \frac{N_u}{l_w h} \right)}{\frac{M_u - l_w}{V_u} - \frac{l_w}{2}} \right] h d \quad (\text{Ec. 33})$$

Si $(M_u / V_u - L_w / 2)$ es negativo, no se debe utilizar la ecuación (C.33).

En cuanto a los valores de las cuantías de acero horizontal para cortante ρ_t , las normativas establecieron los siguientes valores:

Tabla 20. *Cuantía de acero horizontal para cortante en las diferentes normas.*

CCCSR - 84	NSR -98	NSR-10
-------------------	----------------	---------------

$\rho_h \leq 0.002$ $\rho_h \leq 0.0025$ $\rho_h \leq 0.0025$

La falla por cortante es una falla peligrosa, es frágil, con poca capacidad de deformación dentro del rango no-lineal, se debe evitar en los muros de concreto reforzado, aplicando los requisitos y realizando un buen detallado en los mismos.

2.4 Evolución del refuerzo mínimo en muros (C.14).

El código colombiano de construcciones sismo-resistentes del año 1984, emitió el capítulo C.14 y lo denominó muros, en su contenido se evalúa entre otros requisitos, el valor del refuerzo mínimo vertical y horizontal de acuerdo a las cargas, los valores de las cuantías evolucionaron tal como como se mencionó anteriormente las cuantías en el capítulo C11. De la NSR-10, el capítulo se actualizó, pero mantuvo el mismo direccionamiento o enfoque reglamentado en la norma anterior NSR-98. Para la comparación de las normas, se citará lo concerniente a las cuantías y a la separación del refuerzo dentro de los elementos.

El Capítulo C.14 de los 3 reglamentos, mencionan los requisitos que deben aplicarse para el diseño de muros sometidos a carga axial, con o sin flexión. En esta sección se resumen aquellos requisitos que deben ser tenidos en cuenta para un sistema de resistencia sísmica basado en muros de concreto reforzado.

2.4.1 Refuerzo mínimo C.14.3. En la sección C.14.3.2 — La cuantía mínima para refuerzo vertical, calculadas sobre el área bruta del muro en todas las normatividades son:

Tabla 21. *Cuantía mínima para refuerzo vertical en muros de concreto*

Barras o mallas	CCCSR-84.	NSR-98	NSR-10
para barras corrugadas no mayores que No. 5 (5/8") ó 16M (16 mm) con f_y mayor o igual a 420 MPa	0.0012	0.0012	0.0012
para otras barras corrugadas	0.0015	0.0015	0.0015
Para malla electrosoldada de alambre liso o corrugado con alambres de diámetro menor de 16 mm.	0.0012	0.0012	0.0012

En la sección **C.14.3.3** — La cuantía mínima para refuerzo horizontal, calculadas sobre el área bruta del muro son:

Tabla 22. *Cuantía mínima para refuerzo horizontal en muros de concreto*

Barras o mallas	CCCSR-84.	NSR-98	NSR-10
diámetro \leq (5/8") con $f_y \geq$ 420 MPa	0.0016	0.0020	0.0020
para otras barras corrugadas	0.0020	0.0025	0.0025
Malla electrosoldada con alambres de diámetro menor de 16 mm.	0.0016	0.0020	0.0020

Las cuantías mínimas para refuerzo vertical, no han sufrido ninguna modificación, contrario a las mínimas cuantías de refuerzo horizontal, donde inicialmente en la norma del 84 sus valores eran mucho menores que las normas NSR-98 y NSR-10, estos valores se conservan, exigiendo mayor cuantía de acero mínimo en la horizontal que en la vertical, y esto se hace por prevención a que el muro falle a cortante.

En la sección **C.14.3.4** — Los muros con espesores mayores o iguales a 250 mm, y que no hagan parte de espacios en sótanos, deben reforzarse con dos cortinas paralelas a las caras del muro tal como se muestra en la figura 7.

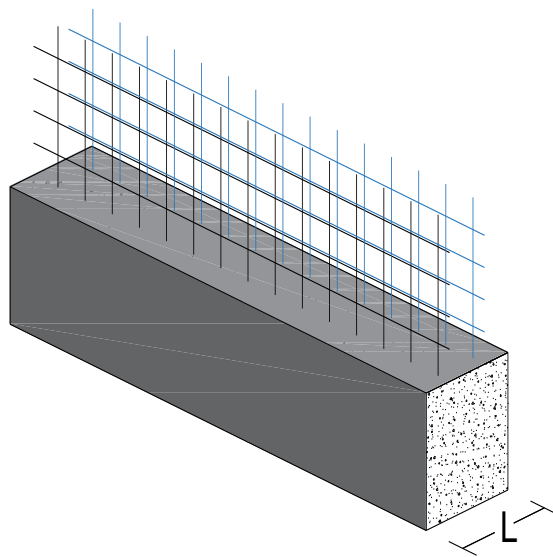


Figura 7. Refuerzo para muros con espesores mayores o iguales a 250 mm.

(a) Una capa consistente en no menos de $1/2$, y no más de $2/3$ del refuerzo total requerido para cada dirección debe colocarse a no menos de 50 mm ni a más de $1/3$ del espesor del muro a partir de la superficie exterior.

(b) La otra cortina, con en el resto del refuerzo debe colocarse a más de 2 centímetros y a menos de $1/3$ del espesor del muro, de la cara interior del muro.

La malla estándar utilizada en Colombia tiene una separación de 15 centímetros lo que hace que se ajuste y sea menor al máximo espaciamiento indicado en las normas NSR-98 y NSR-10. La separación “S” del refuerzo en las dos direcciones, vertical y horizontal como se muestra en la figura 8, no debe ser mayor de tres veces el espesor del muro, ni mayor de 45 centímetros.

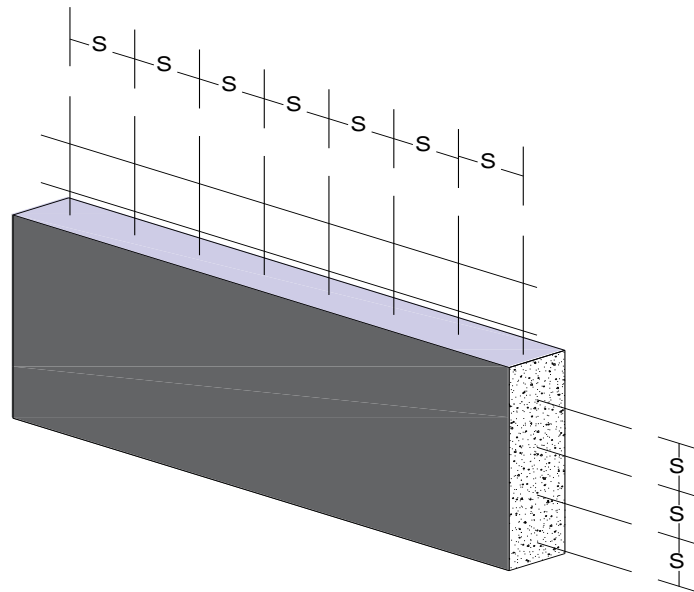


Figura 8. Espaciamiento del refuerzo.

En la sección C.14.3.6 — Cuando el acero vertical es menor a 0.01 veces “Ac” o cuando no se requiere acero a compresión, dicho refuerzo no necesita confinamiento. A_c = Área del concreto.

En la sección C.14.3.7 — Cuando existan aberturas en los muros, se debe colocar mínimo 2 barras de refuerzo con un diámetro mínimo de $5/8$ ” ó (16 mm) en todos los muros que tengan dos capas de refuerzo en ambas direcciones, igualmente colocar como mínimo una barra de $5/8$ ” para

los muros que necesiten una sola capa de refuerzo, y una barra No. 5 (5/8”) ó 16M (16 mm) en los muros que tengan una sola capa de refuerzo en ambas direcciones. Todas las barras que se coloquen deberán tener el anclaje correspondiente a fin de garantizar el desarrollo del f_y en tracción en las esquinas de los vanos.

2.5 Capítulo C.21 Evolución de los Requisitos de diseño sismo resistente

A continuación, se presenta una reseña de las disposiciones descritas en el Capítulo C.21 del Reglamento en el análisis y diseño de elementos de concreto, las cuales son aplicables a estructuras de muros portantes donde las fuerzas de diseño relacionadas con los movimientos sísmicos, se han determinado con base en la disipación de energía en el rango no lineal de respuesta.

Capítulo C.21 CCCSR-84 – requisitos de Concreto en zonas de riesgo sísmico alto

En la sección **C.21.4** — La resistencia especificada del concreto a los 28 días no debe ser menor que 210 Kg/cm^2 . Para el sistema de resistencia sísmica.

2.5.1 Capítulo C.21 Requisitos de diseño sismo resistente NSR-98. Los valores de la resistencia nominal a la compresión f'_c , no debe ser menor que los siguientes valores:

Tabla 23. Resistencia nominal del concreto en los elementos del sistema de resistencia sísmica

Capacidad de disipación de energía en el rango inelástico		
Mínima – DMI	Moderada - DMO	Especial – DES
Sin límite	$f'_c \geq 21 \text{ MPa}$	$f'_c \geq 21 \text{ MPa}$

2.5.2 Capítulo C.21 Requisitos de diseño sismo resistente NSR-10. Los valores de la resistencia nominal a la compresión f'_c , se siguen manteniendo en la NSR-10, sin embargo, en la sección C.21.1.4.2 establece que, para edificaciones de baja altura construidas con muros de carga, que no sobrepasen los tres pisos se pueda usar un f'_c menor a los 21 Mpa.

En la sección **C.8.6.1** — Si se va a utilizar concreto de peso liviano, se debe utilizar el factor λ que multiplica a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del concreto y debe estar contenido en todas las ecuaciones, en este caso se tiene:

$\lambda = 0.85$ para concreto liviano de arena de peso normal

$\lambda = 0.75$ para los otros concretos de peso liviano.

Si una parte de agregado fino de peso liviano se reemplaza por un agregado con un peso normal, se puede interpolar entre los dos valores anteriores, 0.75 y 0.85, igualmente si un concreto tiene agregado fino de peso normal, así como una combinación de agregados gruesos de peso normal y de peso liviano se puede interpolar el valor de λ entre 0.85 y 1.0.

Para el concreto de peso normal $\lambda = 1.0$ se especifica la resistencia promedio a la tracción por hendidamiento del concreto de peso liviano, f_{ct} , Entonces $\lambda = f_{ct} / (0.56\sqrt{f'_c}) \leq 1.0$ en Mpa.

El refuerzo en estructuras con capacidad de disipación de energía moderada (DMO) y especial (DES) de la sección C.21.1.5.2 d la NSR-10, especifica que el refuerzo colocado, además, de soportar en los muros estructurales las fuerzas de flexión y axiales originadas por el sismo, debe cumplir con las especificaciones consignadas en NTC 2289 (ASTM A706M), Grado 420 Mpa.

La norma enfatiza en que la resistencia a la fluencia aportada por los ensayos realizados en las fábricas, sea menores a 125 MPa, además que la relación entre la resistencia de tracción y la resistencia de fluencia real sea mayor a 1.25.

Los muros en zonas DMO, deben cumplir con los requisitos para muros en zonas DES con las reformas que se presentan a continuación:

El cociente $\delta u/hw \geq 0.0035$.

Se deben colocar elementos de borde si el esfuerzo de compresión máximo de la fibra extrema correspondiente a las fuerzas mayoradas más los efectos sísmicos E , es mayor o igual a $0.3f_c$.

El espaciamiento del refuerzo transversal = $\frac{1}{2}$ veces la menor dimensión del elemento de borde, pero no menos de 15 centímetros.

En los dos extremos se debe colocar estribos separados desde la cara del nudo una distancia (S_o) por una longitud (l_o), que no puede ser mayor de 8 veces el diámetro de la barra 8db, ni de 16 veces el diámetro del estribo ni menor de 15 centímetros.

La longitud l_o = longitud, medida desde la cara del nudo a lo largo del eje del elemento estructural, dentro de la cual debe colocarse refuerzo transversal especial, mm, (Capítulo C.21, NSR-10) no debe ser menor que la mayor entre:

- Una sexta parte de la luz libre de la columna.
- La mayor dimensión de la sección transversal de la columna.
- 500 mm.

La sección transversal del refuerzo de estribos cerrados de confinamiento rectangulares, debe tener un área total (A_{sh}) mayores a las calculadas por las siguientes ecuaciones:

$$A_{sh} = 0.2 * \frac{s_{bc} * f'_c}{f_{yt}} * \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \quad (\text{Ec. 34})$$

$$A_{sh} = 0.06 * \frac{s_{bc} * f'_c}{f_{yt}} \quad (\text{Ec. 35})$$

Los estribos utilizados como refuerzo transversal deben tener mínimo un diámetro de 3/8 de pulgada y no deben estar separados a más de 35 centímetros entre ejes.

Los requisitos para muros estructurales especiales (DES) de la norma NSR-10, en cuanto al detallado y diseño, para segmentos de muro vertical; dependen de la relación de las dimensiones (h_w / l_w), y para segmentos de muro horizontal dependen de la relación (l_w / b_w) los límites de las relaciones dimensionales provienen de un criterio de ingeniería. La intención es que la fluencia del refuerzo vertical debida a flexión en el machón limite la demanda de cortante.

En la sección **C.21.9.2.1** — Las cuantías de acero en el alma, ρ_l = relación entre el área de refuerzo longitudinal distribuido al área bruta de concreto perpendicular a este refuerzo, Capítulos C.11, C.14, C.21 y ρ_t = cuantía del área de refuerzo transversal distribuido al área bruta de concreto de una sección perpendicular a este refuerzo, Capítulos C.11, C.14, C.21 para muros estructurales no deben ser menores que 0.0025, excepto que si V_u no excede de $0.083 A_{cv} \lambda \sqrt{f'_c}$, el espaciamiento del refuerzo en cada dirección en muros estructurales no debe exceder de 45 centímetros. El acero que aporta V_n (cortante) debe ser colocado y distribuido a través del plano de cortante.

En la sección **C.21.9.2.2** — Para edificaciones del grupo de uso I, como lo define A.2.5.1, hasta de tres pisos y destinadas exclusivamente a vivienda, se permite utilizar las cuantías mínimas vertical ρ_l y mínima horizontal ρ_t requeridas en C.14.3.

En la sección **C.21.9.2.3** — Si: $V_u > 0.17 A_{cv} \lambda \sqrt{f'_c}$. Se deben colocar como mínimo dos capas de acero.

En la sección **C.21.9.4.1** — V_u , de muros estructurales no debe exceder:

$$V_n = A_{cv} (\lambda \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y) \quad (\text{Ec. 36})$$

Donde:

$\alpha_c = 0.25$ para $hw/lw \leq 1.5$,

$\alpha_c = 0.17$ para $hw/lw = 2.0$ y

Varía linealmente entre 0.17 y 0.25 para hw/lw entre 1.5 y 2.0.

En la sección **C.21.9.6.2** se reglamentan unos requisitos, que solo se aplican para muros que son continuos desde la base hasta la parte superior.

(a) Se debe usar elementos de borde y se reforzarán en la zona de compresión donde

$$C \geq Lw / (600 * (\delta u / hw)) \quad (\delta u / hw) \geq 0.007$$

El factor “c” = profundidad del eje neutro

El cociente $\delta u / hw \geq 0.007$.

Todos los anteriores requisitos han evolucionado, con el propósito de proporcionar una herramienta útil para diseñar un muro de concreto en cualquier zona sísmica de Colombia.

2.6 Diagrama secuencial del diseño de muros de concreto, basado en la norma vigente NSR-10.

Rochel (2012) en su documento “diseño de muros estructurales de concreto reforzado”, presenta un diagrama de flujo que sigue los lineamientos actuales de la NSR-10, consignando secuencialmente, además del procedimiento de diseño, las normas descritas en el reglamento actual.

La figura 9, contiene los datos de las cargas aplicadas al muro y las resistencias de los diferentes materiales a utilizar además realiza comparaciones con respecto a la fuerza cortante, usando el factor de reducción de resistencia ϕ . Vu en cualquier sección horizontal para cortante en el plano

del muro no debe ser mayor que $0.83 f'_{cd}$, donde h es el espesor del muro y d se define como $0.8L_w$.

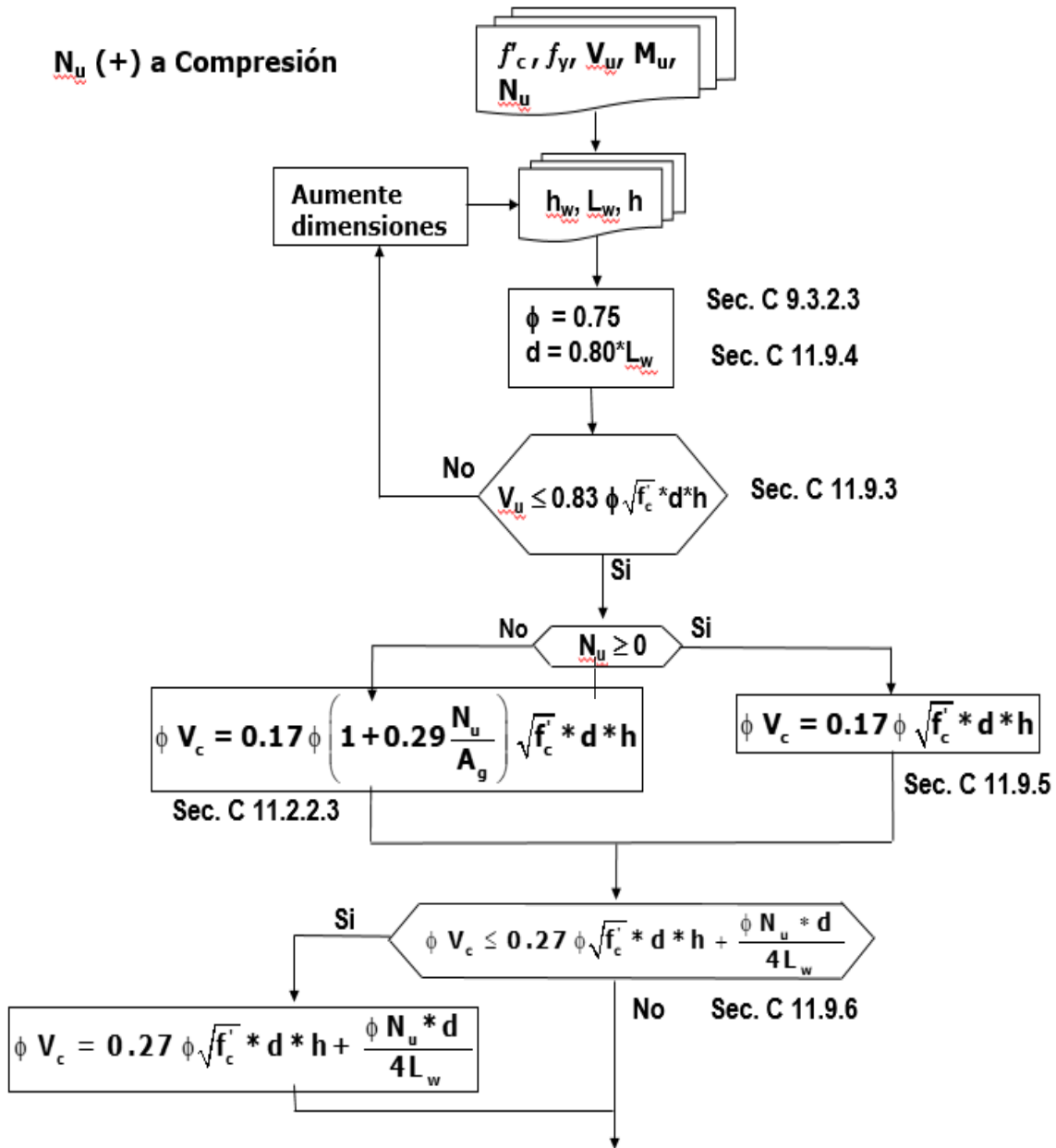


Figura 9. Procedimiento de análisis en el diseño de muros de concreto.

Fuente: (Roche, 2012)

El valor de V_c (fuerza de corte que resiste el concreto) no debe ser mayor a $0.17\lambda f_c'hd$ para muros sometidos a compresión axial de igual manera este valor no puede ser mayor a la ecuación (C.11-8) de la NSR-10, para muros sometidos a tracción axial.

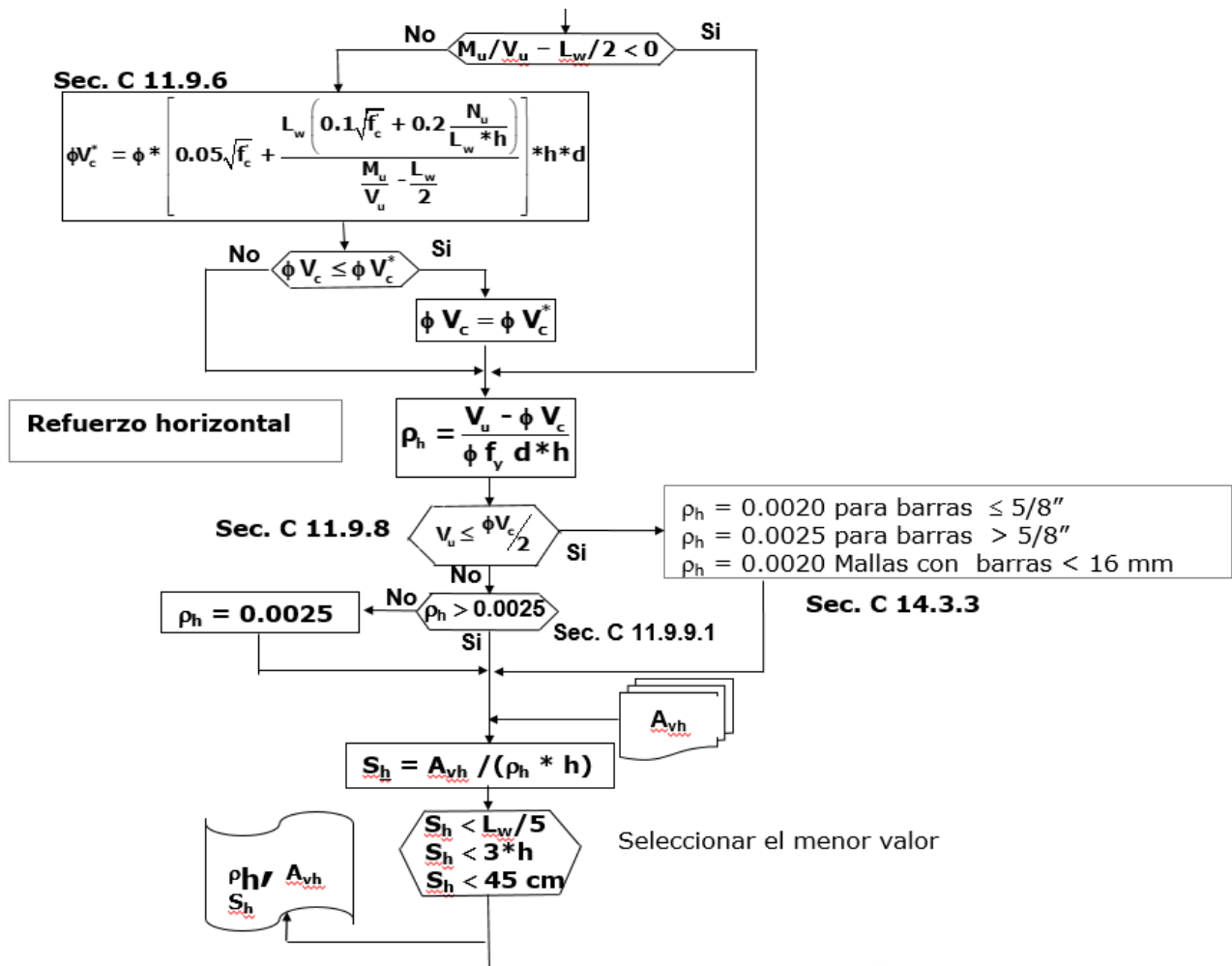


Figura 10. Fase 2 diagrama de flujo. Procedimiento de análisis diseño de muros de concreto.

Fuente: (Roche, 2012)

En la norma del 84 y 98, referían a V_c como esfuerzo de corte, hoy en día en la NSR-10, se habla de fuerza de corte y le han agregado un término adicional que incorpora la fuerza axial N_u ; cuantitativamente este incremento tiene un valor aproximado de 10% (García, 2014).

La figura 10, muestra la comparación del término divisor de la ecuación (C.11-28) de la NSR-10. N_u es positivo para compresión y negativo para tracción. Si $(M_u/V_u - l_w/2)$ es negativo, no

se debe utilizar la ecuación (C.11-28) consignada en la norma actual. Con la cuantía ρ_h de acero horizontal se calcula el refuerzo y el espaciamiento del mismo.

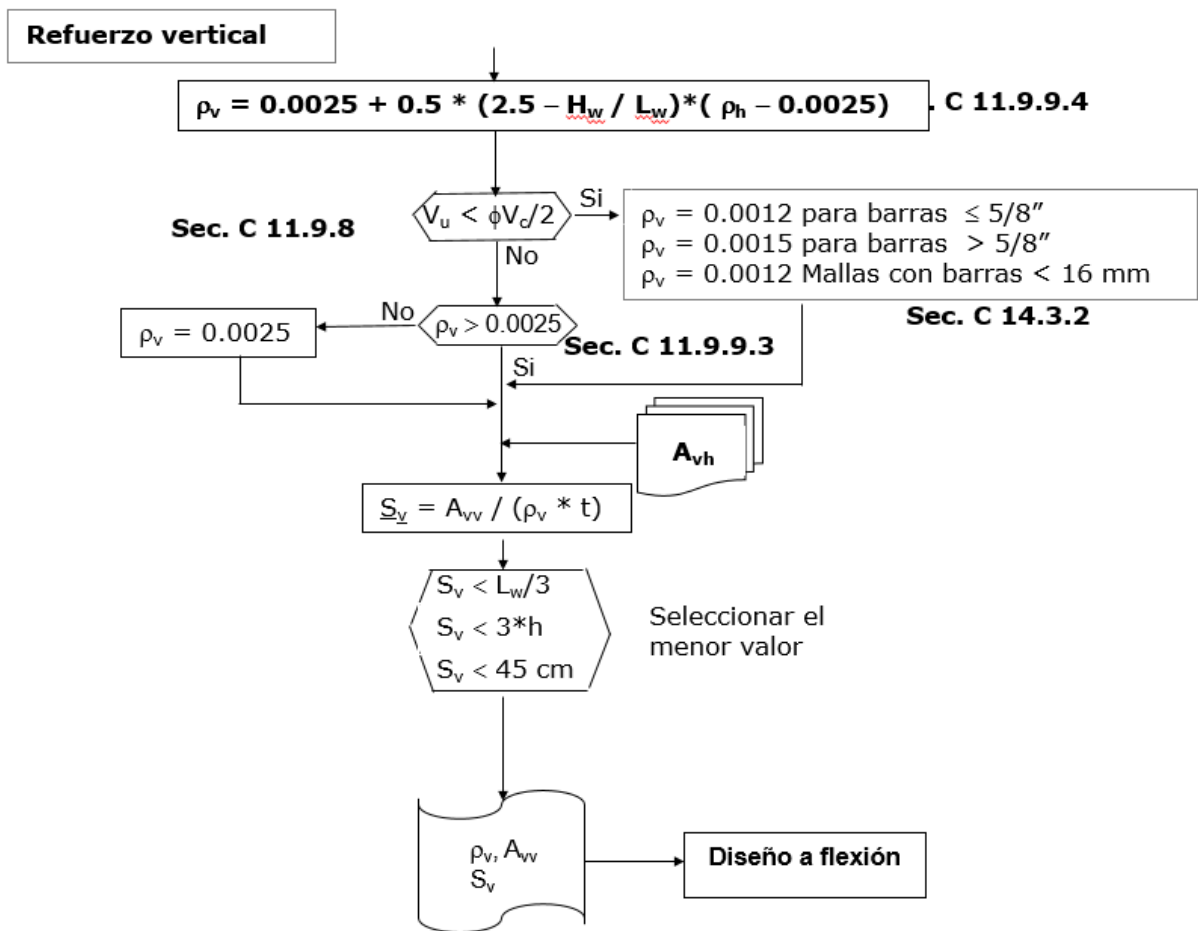


Figura 11. Diseño del refuerzo vertical de Muros de Concreto reforzado

Fuente: (Rochel, 2012).

La figura 11, refiere a la fase III y evalúa la cuantía de refuerzo vertical ρ_v para cortante en el muro y especifica que no debe ser menor que 0.0025, al igual que el espaciamiento del refuerzo tanto vertical como horizontal es normatizado y su valor no debe ser mayor de cualquiera de las tres condiciones, $l_w/5$, $3h$, ó **450** mm. Con el cumplimiento de estos requisitos se diseña el muro y se establece si el refuerzo, con las cuantías calculadas se realiza por medio de mallas electrosoldadas o con varillas de refuerzo y la incorporación de elementos de borde (Blasco).

Asimismo, de las versiones consultadas, las normas colombianas se apoyan en las documentaciones aportadas por investigadores latinoamericanos, los cuales han utilizado además de las teorías propias del comportamiento estructural, la observación post sismo de los daños en las edificaciones, las fallencias constructivas, los tipos de falla y el origen de las fuerzas que las causaron.

En algunas publicaciones de Encofrados (2019) se hace alusión a la demanda de vivienda de muros de concreto como una de las elecciones de construcción más usadas en Latinoamérica, por las razones de rapidez constructiva, por la facilidad de consecución de materiales en la mayoría de esos países y por el alto desarrollo del sistema de construcción utilizado; ya que utiliza formaletas que brindan una secuencia precisa de armado, fundición, formaleteado y desformaleteado (Encofrados, 2019).

Se llevó a cabo un estudio experimental para analizar mejor el comportamiento sísmico de los muros en estas construcciones, lo que les permitió elaborar una guía para el análisis y diseño de viviendas de baja y mediana altura. Los resultados se evaluaron con 39 muros ensayados cuasi estáticamente en una mesa de vibración. Se ensayaron muros con distintas relaciones h_w/l_w , muros totalmente macizos, muros con aberturas localizadas, diferentes tipos de dosificación de concreto, variación en las cuantías de refuerzo y diferentes tipos de acero a cortante en el alma.

El modelo se propuso para calcular la resistencia pico a cortante en los muros de concreto para edificaciones de baja altura. Con la comparación de estudios, así como ensayos anteriores, se seleccionaron las variables más representativas para mejorar las ecuaciones y su predicción en el comportamiento estructural del concreto reforzado.

La investigación aportó ecuaciones que pueden ser utilizadas para las normatividades de los países latinoamericanos, con variables para estimar el aporte a la resistencia a cortante en los muros de las viviendas, por parte del concreto y del acero (Carrillo & Alcocer, 2013).

3. Análisis evolutivo de las normas y consideraciones a futuro.

Para la actualización de la normatividad vigente NSR-10, se tuvieron en cuenta los documentos que sirvieron como base en la estructuración de la primera norma CCCSR-84, los requisitos publicados en el año 2006 del documento “disposiciones recomendadas para el desarrollo de regulaciones sísmicas para nuevas edificaciones” *NEHRP* (FEMA 450–2006(36)) al igual que se tuvieron en cuenta los requisitos del *International Building Code* (IBC-2009(40)).

En la elaboración de la primera norma del 84, se utilizaron las normas emitidas por la Asociación de Ingenieros estructurales de California, (SEAOC), además las de la Asociación de Ingeniería Sísmica AIS100 81 (24) y AIS 100-83(25).

Para la elaboración de la primera actualización NSR-98, se usó lo emitido por la Asociación de Ingenieros estructurales de California, (SEAOC)1996(47), UBC-97(39) en su documento “disposiciones recomendadas para el desarrollo de regulaciones sísmicas para nuevas edificaciones” *NEHRP* 1994(35) y la Norma AIS 100-97(27).

En los documentos base (Reglamento NSR-10) se emplearon, SEAOC 1999(48), *NEHRP* 2006(36), IBC-2009(40), Eurocódigo-8(33) y Norma AIS 100-09(28). (AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

3.1 Microzonificación

A puertas de la implementación de una nueva actualización en el año 2020, se realizarán nuevos ajustes a los requisitos que han evolucionado desde el año 1984 y que actualmente utilizamos en el diseño de las edificaciones de muros de concreto reforzado, se han realizado estudios posteriores a la NSR-10 de los eventos sísmicos, de la geología y la sismología regional en las zonas del país, investigaciones (Bermúdez, Franco, & Martínez, 2002) sobre la amplificación de ondas, estudios geotécnicos y movimientos sísmicos en superficie que hará posible la microzonificación de las capitales de los departamentos, de las ciudades secundarias o aquellas que tengan una cantidad importante en el número de habitantes. Se estudiará con mayor precisión los factores de sitio F_a , F_v ; asignándolos por ciudad y región (Farias García & Carrillo León, 2006), las zonas que no se puedan micro zonificar seguirán utilizando los factores de la NSR-10, ya que dichos factores están incorporados en el espectro elástico de diseño de acuerdo a la zona sísmica de ubicación de los proyectos.

3.2 Arquitectura de las edificaciones de muros

Las edificaciones de baja altura construidas con el sistema de muros, son muy utilizados para vivienda en Colombia, pero una de las desventajas de este sistema es el poco espacio que aporta en el piso inferior, donde generalmente se proyectan la zona de parqueaderos y se construyen bodegas; esta limitación se puede contrarrestar haciendo que los proyectos se desarrollen sobre áreas más grandes que abarquen estos espacios en sitios aledaños a la edificación.

Otra desventaja es el concepto arquitectónico que debe tener la edificación, se debe procurar que la cantidad de muros en los dos sentidos sean similares, distribución con la que se puede contrarrestar mejor el efecto sísmico de las cargas Rochel (2012), establece recomendaciones para que una estructuración pueda lograr un buen comportamiento sísmico, entre ellas está, el construir

estructuras livianas, para eliminar el efecto que produce la inercia de las masas cuando se están desplazando, de igual manera las edificaciones deben ser sencillas, simétricas y con regularidad tanto en planta como en altura, así se reduce por simetría los efectos por torsión.

En el tema de estructuras por sencillez se deben usar sistemas poco complejos que puedan analizarse con modelos matemáticos más cercanos a la realidad del comportamiento de la estructura, regulares en planta para evitar desplazamientos diferentes en las esquinas de la edificación y regulares en altura para disminuir el efecto del momento de volcamiento que es una de las principales variables que hace que la estructura se vuelva más costosa (Romero, 2016).

3.3 Espesores mínimos de muros

En el caso de los espesores de muros, por ejemplo, no existe en las normatividades ningún párrafo, sección o tabla, que defina concretamente cual es el mínimo espesor que debe usarse para muros de concreto, en la sección C.14.6.1 se habla de muros no portantes y especifica que:

Los muros que no sean de carga deben tener un espesor mínimo de 10 centímetros y no pueden ser menores en espesor de $1/30$ de la luz mínima entre los elementos que le suministren apoyo lateral, de esto se puede interpretar que, si la dimensión mínima de un muro no estructural es de 10 centímetros, debería en el caso de un muro estructural tener al menos ese mínimo espesor. Sin embargo, aún no se ha definido en las normas esta dimensión mínima para muros de concreto reforzado.

Las edificaciones en estudio, utilizan los muros que dividen los diferentes espacios como elementos estructurales que reciben a las losas de los entrepisos y que toman las fuerzas

horizontales de sismo, los muros son encargados de las cargas de gravedad y de las fuerzas laterales de sismo, por tanto, se deben diseñar como elementos sometidos a flexo-compresión y fuerza cortante. Los muros de concreto armado realizan una función semejante a los muros de mampostería reforzada o confinada, la diferencia radica en el material con que se construyen, dado que el concreto aporta una mayor resistencia en compresión, resistencia en cortante y por ende mayor módulo de elasticidad.

Se puede obtener resultados más satisfactorios usando muros de concreto con espesores más pequeños que los construidos en edificaciones cuya mampostería es la reforzada o la confinada. Estos espesores deben permitir la colocación del concreto y como mínimo la instalación de una sola cortina de malla, en países como México, Chile y Perú se ha normalizado que el mínimo espesor de un muro de carga sea de 10 centímetros. En Colombia en zonas de actividad sísmica media o baja, se han utilizado espesores de 8 centímetros, un poco más de 3 pulgadas, con la colocación de una malla electrosoldada para edificaciones de baja altura. El concepto de los ocho centímetros se debe entre otras a las primeras formaleas que se importaron y utilizaron en el país, formaleas tipo Outinord o Contech que venían calibradas para lograr un espesor de 8 centímetros una vez desencofrado el muro de concreto (Aycardi, 2010).

En los cálculos, el espesor de los muros es proporcional a la altura de la edificación, según la elección depende el comportamiento de la estructura para atenuar los efectos de compresión, flexo compresión y cortante. Es importante la implementación de nuevas reglas que permitan clasificar cuantitativamente; el espesor mínimo de muros en las edificaciones en Colombia de acuerdo a la zona sísmica, al tipo de edificación y a los requisitos de diseño.

3.4 Mallas electrosoldadas.

El uso de las mallas electrosoldadas, se viene implementando en Colombia desde antes de la norma del 98, su uso facilitó el proceso constructivo de los muros, dado que el uso de estas se redujo la operación y el tiempo de instalación hasta en un 80% lo cual, reflejándose a su vez en los costos de construcción por la optimización en el tiempo de uso de mano de obra.

En muchos países están prohibidas las mallas electrosoldadas como un refuerzo que haga parte de un sistema de resistencia sísmica, (Mesa, 2018) muchas veces se coloca como armadura para evitar problemas por retracción que es el acortamiento que experimenta el concreto usado en los muros durante el proceso de endurecimiento y secado, originado principalmente por la pérdida por evaporización del exceso de agua de mezclado. Las mallas se instalan para evitar los movimientos generados por el cambio de temperatura, por lo general estos son reprimidos parcial o completamente y, por tanto, provocan esfuerzo, el concreto es muy débil en tensión y propenso al agrietamiento.

Con el empleo de barras de refuerzo en los muros, se puede llegar a deformaciones considerables y garantizar grandes ductilidades en los elementos, pero con las mallas electrosoldadas las deformaciones son muy pequeñas en el rango inelástico (Mesa Mazo, 2018).

3.5 Elementos de borde

En una edificación de muros portantes de baja altura, lo más recomendable es no tener que usar elementos de borde, debido al empleo de espesores pequeños, con los cuales es muy difícil construir dichos elementos. En la norma NSR-10 vigente y en las anteriores actualizaciones, no está consignada la dimensión mínima que deba tener el elemento de borde, se debe tener cuidado

considerando el pequeño espesor utilizado para la construcción del muro. Sin embargo, se tendrá que estudiar y normatizar estas dimensiones con las condiciones que los procesos constructivos requieran.

Se deben colocar estribos con una correcta distribución, en los elementos de borde es fundamental la colocación de refuerzo transversal, esto permite mejorar el confinamiento del concreto, y el acero instalado longitudinalmente en los bordes alcanza deformaciones, contribuye a aumentar la ductilidad y capacidad de disipación de energía igualmente retrasa el posible pandeo del muro ante cargas a compresión. Según (Alcocer, 1995) cuando se presenta fluencia en el acero a flexión, se aumentan los esfuerzos a compresión en el concreto para equilibrar la tensión, por esta razón, ante la ausencia de acero de confinamiento, se podría alcanzar una falla por aplastamiento, produciendo desprendimiento del concreto en los elementos de borde, así que se debe hacer énfasis en el uso obligatorio de este refuerzo transversal.

4. Análisis

La evolución normativa de los requisitos en las actualizaciones de 1984, 1998 y 2010, en edificaciones de muros de concreto de baja altura en Colombia ha mostrado una tendencia de aumento en el valor de los coeficientes que involucran la resistencia a cargas laterales, garantizando una mayor rigidez, limitando los desplazamientos y permitiendo una mejor acción para contrarrestar el efecto de las acciones sísmicas.

En cuanto al refuerzo, se debe enfatizar en continuar con el armado en las direcciones vertical como horizontal, soportando de esta manera la fuerza cortante en los dos sentidos perpendiculares a la dirección del muro contrarrestando así el efecto de la fuerza axial y el momento flector.

Es fundamental el control de las asimetrías tanto en planta como en elevación, ya que los muros se representan como una viga empotrada en voladizo y el modo de deformación debe ser dominado por la flexión. Por eso es importante recalcar en las nuevas actualizaciones que los sistemas se diseñen con una simetría regular de los elementos en planta, para impedir que se originen efectos por torsión. Igualmente se debe recomendar disminuir la presencia de aberturas en los muros que puedan afectar el desempeño sísmico de la edificación.

Las normas no son claras respecto a las dimensiones mínimas en los muros. Se puede trabajar con cuantías menores y con espesores pequeños si se garantiza la estabilidad del muro, cuando se someta a la acción de las fuerzas sísmicas. Es necesario realizar chequeos P-delta los cuales revisan el aumento en las deflexiones horizontales y en las fuerzas internas de la estructura, verificando

que las deformaciones cumplan los requisitos de resistencia a flexo compresión y cortante establecidos en los reglamentos.

Muchos de los requisitos establecidos desde la primera versión de la normativa hasta la más vigente, han tomado como referencia otros reglamentos, resultados de muchas investigaciones de diseñadores estructurales de otros países, quienes han tenido que padecer los estragos que originan los movimientos telúricos y que basados en la observación post-sismo de los daños causados en los elementos de los diferentes sistemas estructurales, han identificado las fallas, deficiencias y las posibles variables que las producen. Por otra parte, se han aportado nuevas ecuaciones a través de las investigaciones realizadas con modelos a escala en el que se puede apreciar por prueba error las falencias en los elementos que conforman las estructuras de muros de concreto reforzado ante la acción de cargas sísmicas (Briceño & Carreras, 2013).

Solo treinta y cuatro años han pasado desde la emisión del primer reglamento en Colombia. Con dos actualizaciones se puede decir que se han normalizado satisfactoriamente los requisitos más representativos en el diseño de muros portantes de concreto, sistema estructural con amplias ventajas que se está implementando en la construcción de edificaciones de baja altura. En sectores de amenaza sísmica media y baja, se han realizado proyectos con solo muros de espesores y cuantías mínimas funcionando sin problemas, diseñados de acuerdo a lo prescrito en la normatividad vigente NSR-10.

Las entidades encargadas de establecer los requisitos definitivos en las actualizaciones (para que cumpla con los objetivos principales de las normativas), deben impulsar la implementación de

más estaciones de monitoreo que abarquen y registren con mayor precisión la magnitud de las ondas sísmicas en el territorio nacional. De esa manera, se podrá pensar en la elaboración de normativas adaptadas a cada población, con requisitos propios ajustados a la sismología y a las condiciones geotécnicas específicas y particulares de cada región.

La aplicación única de la normatividad vigente NSR-10 no es garantía de que las estructuras estén bien diseñadas. La respuesta ante eventos sísmicos recientes y ensayos de laboratorio muestra la necesidad de los elementos de borde y sus espesores, los cuales, aunque las normas no los exigen, es buena práctica colocarlos al menos en los dos primeros pisos. De igual manera, es recomendable colocar estribos en el alma de los muros, pues las capas de refuerzo trabajan a corte, pero no confinan.

5. Conclusiones.

Los cambios que han tenido las variables en los coeficientes de las ecuaciones más representativos tienen que ver los parámetros sísmicos, la modificación realizada a las irregularidades de la estructura en lo concerniente a ausencia de redundancia, afectan el valor final de R , variando la capacidad de disipación del sistema estructural en el rango inelástico. En la NSR-10, se agregó la irregularidad en planta denominada irregularidad torsional extrema (1bP) con un valor $\phi_p = 0.8$, en cuanto a las irregularidades por altura se adicionaron dos nuevos coeficientes, la irregularidad extrema en rigidez (1bA) con un valor de $\phi_a = 0.8$ y la discontinuidad extrema en la resistencia (5bA) con un valor $\phi_a = 0.8$. Desde la NSR-10 con los valores de los coeficientes de irregularidad tanto en planta como en altura y la incorporación del análisis de ausencia de redundancia; el valor de R disminuyó, aumentando la fuerza sísmica. Otro cambio es la disminución de las combinaciones de carga en la NSR-10 comparadas con la NSR-98, y el aumento aproximado de un 20.5% en el módulo de elasticidad de la NSR-10, logrando que se elevara la rigidez de las edificaciones y por ende la disminución en los valores de la deriva.

Las nuevas actualizaciones deben reglamentar espesores mínimos de los muros para poder colocar como mínimo dos capas de refuerzo y mejorar la estabilidad a cargas de compresión, ya que, en un muro de 10 centímetros, es ajustado colocar dos cortinas de mallas electrosoldadas y además permitir que el concreto con las especificaciones de sus agregados pueda fluir normalmente. En México, Chile y otros países latinoamericanos se ha reglamentado que, a pesar de poder reforzar el muro con cuantía mínima, desde el punto de vista de la resistencia; es mejor

utilizar doble cortina de malla electrosoldada para aportar mayor estabilidad y optimizar el desempeño del concreto dentro del muro (Briceño & Carreras, 2013). En cuanto a los muros especiales de concreto (DES), se debería reglamentar que, para garantizar su comportamiento sísmico, se armen con doble capa de armadura.

La evolución de las normas de diseño es inevitable, ya que, el descubrimiento de nuevos materiales y el uso de nuevas tecnologías tienden a atenuar o contrarrestar definitivamente los movimientos sísmicos de las estructuras ante la eventualidad de un sismo. La aparición de aisladores elastoméricos con su capacidad de amortiguamiento basados en dispositivos de láminas de acero con núcleos de plomo, la introducción de nuevos agregados como fibras de acero y de carbono en los muros, la utilización de mallas electrosoldadas de alta resistencia entre otros, harán que las nuevas actualizaciones desarrollen teorías más avanzadas y confiables para la construcción de las nuevas edificaciones de muros de concreto reforzado en el futuro.

Referencias Bibliográficas

- AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá.
- AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1998). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98*. Obtenido de <https://camacol.co/sites/default/files/IT-Reglamentos/TituloA.PDF>
- Alcocer, M. S. (1995). *Comportamiento y Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado: Muros Estructurales*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres e Instituto de Ingeniería. Obtenido de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Diciembre2005/pdf/spa/doc6517/doc6517-contenido.pdf>
- Andes, U. L. (2017). *Reminiscencias de Ingeniería*. Bogotá.
- Aranguren Sedano, A. (2011). *Análisis Comparativo de las Implicaciones Económicas entre la NSR-98 y NSR-10 (Caso de Estudio en la Ciudad de Bogotá)*. Bogotá.
- Bermúdez, M. L., Franco, L. E., & Martínez, S. E. (2002). *Cálculo del período fundamental del suelo como herramienta para la microzonificación sísmica: casos colombianos*. Bogotá.
- Blasco, A. B. (s.f.). *Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto armado*. Capítulo de Ingeniería Civil.
- Briceño, A. P., & Carreras, N. H. (2013). *Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011*.
- Briceño, A., & Carreras, N. (2013). *Análisis y diseño estructurales de muros de concreto considerando las experiencias de los terremotos de Chile y Nueva Zelanda*. Obtenido de

https://www.construccionenacero.com/sites/construccionenacero.com/files/u11/ci38_382_36_teg_muros_estructurales_segun_chile_2010_y_nz_2011.pdf

Camacol. (2011). *Implicaciones Económicas del Reglamento NSR-10 en el Diseño Sísmico de Edificaciones de Acero*. Obtenido de Encuentro Internacional del Acero en Colombia: [http://proyectos.andi.com.co/cf/Documents/Documentos de Interes/Implicaciones económicas del reglamento NSR 10 en el diseño sísmico de edificaciones de acero.pdf](http://proyectos.andi.com.co/cf/Documents/Documentos%20de%20Interes/Implicaciones%20económicas%20del%20reglamento%20NSR%2010%20en%20el%20diseño%20sísmico%20de%20edificaciones%20de%20acero.pdf)

Carrillo, J., & Alcocer, S. M. (2013). *Resistencia a cortante de muros de concreto reforzado para diseño sísmico de vivienda de baja altura*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Julian_Carrillo/publication/262003797_Resistencia_a_cortante_de_muros_de_concreto_reforzado_para_diseno_sismico_de_vivienda_de_baja_altura_Shear_strength_of_RC_walls_for_seismic_design_of_low-rise_housing/links/0c96053

Casabonne, C. (2001). El edificio de muros portantes.

Cotes Rincones, M., & Hoyos Luna, I. (2016). *Estudio de vulnerabilidad sísmica del edificio Alvaro Beltrán Pinzón*. Bucaramanga.

Encofrados, T. y. (2019). *Soluciones completas de encofrados túnel*.

Farias García, D., & Carrillo León, W. J. (2006). *Perspectivas en la estimación del espectro sísmico de diseño de puentes en Colombia*. Bogotá: Ciencia e Ingeniería Neogranadina.

García, L. (2014). *Desarrollo de la normativa sísmo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición*. Dossier. doi:<http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i41.785>

Herrera, A. J. (2014). *Construcción de edificios con muros de ductilidad limitada*.

- Julian Carrillo, F. E. (2015). Evaluación de los costos de construcción de sistemas estructurales para viviendas de baja altura y de interés social. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 479.490.
- Mesa Mazo, J. (2018). *Revisión de literatura sobre el comportamiento sísmico de la malla electrosoldada como refuerzo principal en muros estructurales delgados de concreto reforzado*. Antioquia.
- Ministerio de Obras Públicas, Colombia. (1984). *Decreto 1400 de 1984 Ministerio de Obras Públicas*. Obtenido de <https://www.redjurista.com>
- Rochel, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Medellín: Fondo editorial Universidad EAFIT.
- Romero, G. V. (2016). *Procedimiento de análisis y diseño de muros portantes de concreto reforzado bajo un ambiente informático*. Bogotá.