

DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.5933>



Comparación entre el ACI 318-19 y la NSR-10 para diseño estructural de pórticos de concreto en zonas de amenaza sísmica alta

Daniel Ramírez-Sepúlveda^a ■ Leonardo Cano-Saldaña^b ■
Cristhian Amariles-López^c

Resumen: en este trabajo se realizó un análisis comparativo de la Norma Colombiana Sismorresistente NSR-10 y el reglamento ACI 318-19 (base del próximo título C de la norma NSR actualmente en desarrollo). En este cotejo se detallaron las exigencias técnicas actuales presentes en ambos reglamentos para sistemas de pórticos de concreto reforzado en zonas de amenaza sísmica alta. Inicialmente se hizo un análisis comparativo entre el cuerpo del título C de la NSR-10 y el reglamento ACI 318-19, que mostró las diferencias en la disposición de los capítulos presentes en cada normatividad. De este análisis se obtuvo una matriz comparativa y los mapas de ruta correspondientes a cada capítulo, que facilitaron la búsqueda y comprensión de las diferencias encontradas en la disposición de los capítulos. Luego se hizo un segundo análisis comparativo y se confrontaron uno a uno los requisitos para elementos pertenecientes a estructuras con capacidad especial de disipación de energía. De esta segunda comparación se detallan las diferencias más relevantes encontradas entre las especificaciones de ambas normativas, acompañadas de una breve justificación de los cambios encontrados. Por último, se procedió al diseño estructural de dos edificaciones aporticadas de concreto reforzado, siguiendo los lineamientos de ambas normativas con el fin de realizar un comparativo final de las cuantías de refuerzo y volúmenes de concreto por medio de las cuales se analizó el impacto económico que generará la aplicación de las nuevas especificaciones establecidas en el reglamento ACI 318-19. Se encontró una diferencia porcentual de aumento de costos del 3.3 %. Este es un dato relevante para los ingenieros diseñadores y constructores ya que es un claro indicativo de los impactos que tendrán dichos cambios en la futura NSR.

Palabras clave: análisis comparativo normativo; NSR-10; ACI 318-19; normatividad sismorresistente; estructuras de concreto; pórticos de concreto

Recibido: 24/08/2021

Aceptado: 06/05/2022

Disponible en línea: 30/12/2022

Cómo citar: Amariles López, C., Ramírez-Sepúlveda, D., & Cano-Saldaña, L. (2022). Comparación entre el ACI-318-19 y la NSR-10 para diseño estructural de pórticos de concreto en zonas de amenaza sísmica alta: Comparison between ACI-318-19 and NSR-10 for structural design of concrete frames in high seismic hazard zones. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 32(2), 115-129. <https://doi.org/10.18359/rcin.5933>

* Artículo de revisión - comparación normativa.

^a Ingeniero Civil. Grupo Quimbaya, Programa de Ingeniería Civil, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. Correo electrónico: dframirez@uqvirtual.edu.co

^b PhD, MSc, Ingeniero Civil. Grupo Quimbaya, Programa de Ingeniería Civil, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia. Correo electrónico: lcانو@uniquindio.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3073-7057>

^c MSc, Ingeniero Civil. Grupo Gicivil, Programa de Ingeniería Civil, Universidad Libre Seccional Pereira, Pereira, Colombia. Correo electrónico: cristhian.amariles@unilibre.edu.co ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9858-2795>

Comparison between ACI 318-19 and NSR-10 for the structural design of concrete frames in high seismic hazard zones.

Abstract: this work conducted a comparative analysis of the Colombian Seismic Resistant Standard NSR-10 and the ACI 318-19 regulation (the basis of the next Title C of the NSR standard currently under development). In this comparison, the current technical requirements present in both regulations for reinforced concrete portal frame systems in high seismic hazard zones were detailed. Initially, a comparative analysis was made between the body of Title C of NSR-10 and ACI 318-19, which showed the differences in the arrangement of the chapters present in each regulation. From this analysis, a comparative matrix and the road maps corresponding to each chapter were obtained, which facilitated the search and understanding of the differences found in the arrangement of the chapters. Then, a second comparative analysis was made and the requirements for elements belonging to structures with special energy dissipation capacity were compared one by one. From this second comparison, the most relevant differences between the specifications of both standards are detailed, with a brief justification of the changes found. Finally, we proceeded to the structural design of two reinforced concrete frame buildings, following the guidelines of both standards in order to make a final comparison of the reinforcement amounts and concrete volumes by means of which the economic impact generated by the application of the new specifications established in ACI 318-19 were analyzed. A percentage difference in a cost increase of 3.3% was found. This is relevant data for engineers, designers, and constructors since it clearly indicates the impact these changes will have on the future NSR.

Keywords: normative comparative analysis; NSR-10; ACI 318-19; seismic-resistant standards; concrete structures; concrete frames.

Introducción

La historia de la normatividad legal de diseño y construcción sismorresistente en Colombia inicia en 1984 con la adopción del Código Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (CCCSR-84) expedido por medio del Decreto 1400 de 1984, que tuvo una vigencia de 14 años. Más tarde el Congreso de la República aprobó la Ley 400 de 1997, al amparo de la cual se expidió el reglamento de construcción sismorresistente NSR-98 que sustituyó al Código de 1984. La versión vigente de hace más de diez años del Reglamento de Construcción Sismorresistente NSR-10 corresponde a su segunda actualización, expedida por medio del Decreto 926 de 2010. [1], [2].

El título C de la NSR-10 proporciona los requisitos mínimos para cualquier diseño o construcción de concreto estructural en Colombia y se basa en el documento “Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-08)”, preparado por el comité ACI 318 del American Concrete Institute, que se ha adaptado al medio colombiano [2].

Teniendo en cuenta que gran parte del territorio colombiano se encuentra en zona de amenaza sísmica alta [3], es importante que la reglamentación que se utiliza para el diseño y construcción sismorresistente se actualice constantemente, con el fin de que se incorporen los avances técnicos y científicos. En este sentido, se espera una pronta actualización de la NSR, en la que el título C (Concreto Estructural) se basará en el Código ACI 318-19 [4], razón por la cual comparar la actual NSR-10 con el Código ACI 318-19, implica anticipar los cambios que contendrá la futura NSR en el diseño y construcción de estructuras de concreto.

Para hacer la comparación normativa propuesta, se desarrollarán diagramas de ruta obtenidos de la comparación realizada en el cuerpo de ambos reglamentos. Luego se detallarán los cambios más relevantes encontrados en la confrontación de cada uno de los requisitos sismorresistentes dispuestos en ambas normativas, para el caso específico de sistemas estructurales tipo pórticos, con

requisitos especiales de disipación de energía. Por último se detallan las diferencias en cantidades de acero estructural y concreto, para dos estructuras de tipo pórtico diseñadas de acuerdo con las especificaciones de ambas normativas.

Metodología

Teniendo en cuenta la gran relevancia del reglamento ACI-318 dentro de la normatividad nacional, se desarrolló un trabajo metodológico que permite la comparación de ambos reglamentos desde el punto de vista de su organización y estructuración, los cambios técnicos más importantes y el impacto económico que se espera de la aplicación de estos cambios en la construcción de edificaciones en el territorio nacional.

Comparación organizacional y estructural de los documentos

El objetivo de la comparación estructural del cuerpo de las normativas NSR-10 y ACI 318-19 fue establecer las diferencias en la disposición, orden y contenido de cada uno de sus capítulos. De este paralelo se obtuvieron mapas de ruta con los que los profesionales, de una manera ágil y con adecuado nivel de detalle, percibieron y conocieron las diferencias de organización encontradas en ambos reglamentos y la ruta de migración de las especificaciones desde la norma NSR-10 hacia el reglamento ACI 318-19.

La metodología implementada en esta primera etapa consistió en un cuadro de tres columnas: en la primera de ellas se muestra la disposición y orden de las secciones del reglamento ACI 318-19; en la segunda se advierte la disposición y orden de los capítulos de la normativa NSR-10 y finalmente, en la tercera se muestran, a modo de observaciones, todas las diferencias encontradas luego de confrontar uno a uno los capítulos de ambas normativas. A modo de ejemplo, en la figura 1, se ilustra la metodología utilizada para el capítulo 1 de ambas normativas.

ACI 318-19	NSR-10 - Título C	Comentario
PARTE 1: GENERAL		
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES 1.1 — Alcance del ACI 318 1.2 — Generalidades 1.3 — Propósito 1.4 — Aplicabilidad 1.5 — Interpretación 1.6 — Autoridad competente 1.7 — Profesional facultado para diseñar 1.8 — Documentos de construcción y registros del diseño 1.9 — Ensayos e inspección 1.10 — Aprobación de sistemas especiales de diseño construcción o de materiales de construcción alternativos	CAPÍTULO C1 REQUISITOS GENERALES 1.1 — Alcance. 1.2 — Planos y especificaciones. 1.3 — Supervisión técnica. 1.4 — Aprobación de sistemas especiales de diseño o construcción. 1.5 — Obligatoriedad de las normas técnicas citadas en título. 1.6 — Sistema de unidades.	El capítulo C1 de la NSR-10 ya presenta cambios a nivel estructural en la disposición de su primer capítulo con respecto al ACI 318-19, este último establece los requisitos para el diseño de concreto usado con propósitos estructurales incluyendo el concreto simple, concreto con refuerzo preesforzado o no preesforzado, columnas compuestas con perfiles estructurales o tuberías de acero, y anclajes en concreto. Por otro lado, la NSR-10 establece las condiciones a tener en cuenta para los materiales, el diseño, la construcción y la evaluación de resistencia para todo elemento y sistema construido en concreto estructural. El capítulo 1 de la NSR-10 el cual abarca los requisitos generales para los materiales, el diseño, la construcción y la evaluación de resistencia para todo elemento y sistema en concreto estructural se puede encontrar en la totalidad del capítulo 1-Generalidades del código ACI 318-19.
CAPÍTULO 2 NOTACIÓN Y TERMINOLOGÍA 2.1 — Alcance 2.2 — Notación del reglamento 2.3 — Terminología	CAPÍTULO C2 - NOTACIÓN Y DEFINICIONES 2.1 — Notación del Título C del reglamento NSR-09 2.2 — Definiciones	En el capítulo 2 de la NSR-10 y del ACI 318-19 no se encuentra cambios a nivel estructural, ambos capítulos de los dos reglamentos centran su capítulo 2 en la Notación y las definiciones utilizadas en el respectivo código.

Figura 1. Ejemplo de metodología utilizada en la comparación de forma

Nota. Elaboración propia.

Comparación de especificaciones sismorresistentes

Al contrastar las especificaciones sismorresistentes se busca establecer las diferencias en los requisitos de diseño para elementos estructurales dispuestos en el capítulo C.21 del título C del reglamento colombiano NSR-10 y los dispuestos en el capítulo 18 del reglamento americano ACI 318-19. Para el segundo caso, se estudiaron los requerimientos establecidos para elementos y sistemas estructurales que se encuentran asignados a las capacidades de disipación especial de energía (DES). En cuanto al código ACI 318-19, se analizaron las disposiciones establecidas para los miembros y sistemas estructurales pertenecientes a las categorías de diseño sísmico (CDS) catalogadas como D, E y F.

La metodología desarrollada para abordar este objetivo consistió también en un cuadro

comparativo de tres columnas: la primera aborda los requerimientos dispuestos en el reglamento ACI 318-19; la segunda contiene las especificaciones que establece el reglamento NSR-10 y la tercera contiene, a modo de comentario, todas las diferencias encontradas en la confrontación de las secciones de ambas normativas. En la figura 2 se observa, a modo de ejemplo, la comparación realizada para un apartado del capítulo de columnas en estructuras con capacidad especial de disipación de energía.

Comparación entre el diseño estructural realizado con NSR-10 y con ACI-318-19

Con el fin de establecer el impacto económico que se espera tener en el país con la implementación de los cambios normativos incluidos en el

Columnas en estructuras con capacidad de disipación de energía especial		
ACI 318-19	NSR-10	Comentarios
(c) Para acero Grado 550 $6d_b$ de la menor barra de refuerzo longitudinal. (d) S_o según se calcule por medio de la ecuación (18.7.5.3): $S_o = 100 + \left(\frac{350-h_x}{3}\right) \quad (18.7.5.3)$ El valor de S_o de la ecuación (18.7.5.3) no debe exceder 150 mm y no es necesario tomarlo menor a 100 mm. 18.7.5.4 La cantidad de refuerzo transversal debe cumplir lo exigido por la tabla 18.7.5.4. Los factores de resistencia de concreto k_f y de efectividad de confinamiento k_n deben calcularse de acuerdo a las ecuaciones (18.7.5.4a) y (18.7.5.4b) respectivamente: (a) $k_f = \frac{f'_c}{175} + 0.6 \geq 1.0 \quad (18.7.5.4a)$ (b) $k_f = \frac{n_l}{n_l - 2} \quad (18.7.5.4b)$ Donde n_l es el número de barras longitudinales, o paquetes de barras, alrededor del perímetro del núcleo de una columna con estribos cerrados de confinamiento que están soportadas lateralmente por una esquina del estribo cerrado de confinamiento o con ganchos sísmicos.	(c) según lo definido en la ecuación (C.21-5) $S_o = 100 + \left(\frac{350-h_x}{3}\right) \quad (C.21-5)$ El valor de S_o no debe ser mayor a 150 mm y no es necesario tomarlo menor a 100 mm. C.21.6.4.4 – Debe proporcionarse refuerzo transversal en las cantidades que se especifican de (a) o (b) a menos que en 21.6.5 se exija mayor cantidad. (a) La cuantía volumétrica de refuerzo en espiral o de estribos cerrados de confinamiento circulares ρ_s no debe ser menor que la requerida por la ecuación (C.21-6) $\rho_s = 0.12 \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (C.21-6)$ Y A_{sh} no debe ser menor que la requerida por la ecuación (C.10-5) $\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \left(\frac{f'_c}{f_{yt}} \right) \quad (C.10-5)$ (b) El área total de la sección transversal del refuerzo de estribos cerrados de confinamiento rectangulares no debe ser menor que la requerida por las ecuaciones (C.21-7) y (C.21-8). $A_{sh} = 0.3 \frac{s_b f'_c}{f_{yt}} \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \quad (C.21-7)$ $A_{sh} = 0.09 \frac{s_b f'_c}{f_{yt}} \quad (C.21-8)$	La norma NSR-10 en la sección C.21.6.4.4 establece las cantidades para disponer el refuerzo transversal, bajo dos incisos en los cuales se establece la cantidad de refuerzo calculada de acuerdo (ecuaciones C.21-6 y C.10-5) y (ecuaciones C.21-7 y C.21-8). Por otro lado, el código ACI 318-19 en la sección 18.7.5.4 establece que la cantidad de refuerzo trasversal para columnas depende de dos condiciones: (a) $P_u \leq 0.3A_g f'_c$ o $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$ (b) $P_u > 0.3A_g f'_c$ o $f'_c > 70 \text{ MPa}$ De acuerdo a la situación que se genere, ACI 318-19 plantea ahora 3 expresiones para cada caso. ACI 318-19 agregó las ecuaciones (c) y (f) en la tabla 18.7.5.4 las cuales dependen del factor de resistencia de concreto k_f y del factor de efectividad de confinamiento k_n.

Figura 2. Ejemplo de metodología utilizada en la comparación de especificaciones sismorresistentes

Nota. Elaboración propia.

ACI-318-19, de acuerdo con las especificaciones de cada normativa se realizó el diseño estructural de una edificación típica de pórticos de concreto reforzado, con cuatro luces iguales en los dos sentidos, distancias en cada vano individual de 5 m, con vigas de 45x45 cm de sección, columnas de 60x60 cm y 60x55 cm de sección y viguetas de 15x30 cm de sección. La estructura es para uso residencial y está localizada en una zona de amenaza sísmica alta ($A_a=0.25$, $A_v=0.25$), tiene cinco pisos de altura, suelo tipo E, sin sótano, con una altura libre de piso de 2.3 m (figura 3), y usando el espectro elástico de diseño mostrado en la figura 4, ambas alternativas se diseñan según los criterios y especificaciones sismorresistentes para estructuras con capacidad especial de disipación

de energía (capítulo C.21 de la NSR-10 y capítulo 18 del ACI-318-19).

Cabe resaltar que los diseños de ambas estructuras tienen en común los siguientes aspectos: 1) poseen las mismas cargas de servicio, que fueron tomadas de las secciones B.3.4.1: cargas muertas mínimas de elementos no estructurales y B.4.2.1-1: cargas vivas mínimas uniformemente distribuidas, que se evaluaron acorde con el título B de la norma NSR-10; 2) el análisis sísmico de ambas estructuras fue hecho de acuerdo con las especificaciones del título A de la NSR-10, del cual se obtiene el espectro de diseño utilizado y que se muestra en la figura 4 y 3); no diseñó la cimentación de la estructura.

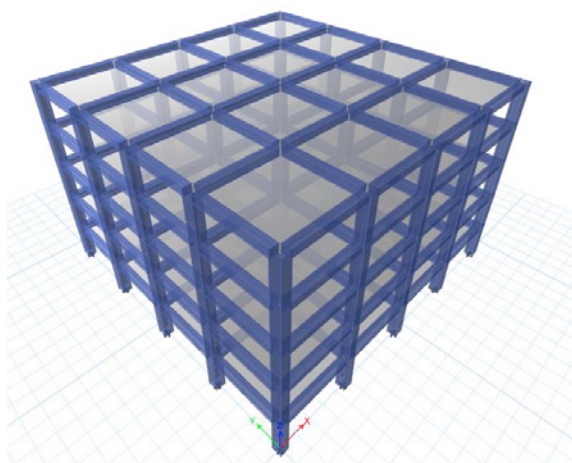


Figura 3. Modelo estructural de edificación diseñada para comparación

Nota. Elaboración propia.

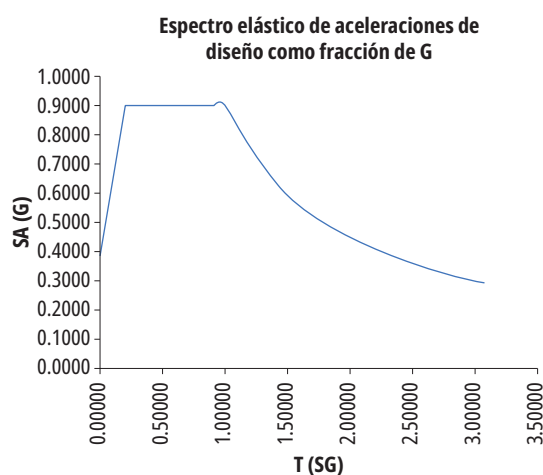


Figura 4. Espectro de diseño utilizado

Nota. Elaboración propia.

El comparativo final se basa en la compilación de las cuantías de refuerzo y volúmenes de concreto, por medio del cual fue posible hacer un análisis porcentual aproximado de los costos que generaría la aplicación de las nuevas especificaciones establecidas en el código ACI 318-19 comparado con la NSR-10.

Resultados

A continuación, se detallan todos los resultados obtenidos durante la realización de este estudio.

Resultados de la comparación estructural

En cuanto al orden, disposición y contenido de cada uno de los capítulos que conforman cada normativa, se evidenció una sustancial transformación en la organización de los capítulos. En primera instancia, el reglamento ACI 318-19, desde la edición de 2014, incorporó modificaciones trascendentales a propósito de su organización y disposición estructural. Está dividido en diez partes, tal como se muestra en la figura 5. El objetivo de este reglamento es presentar un lenguaje claro y consistencia de estilo, para que los ingenieros tengan la seguridad de que han cumplido con todos los requisitos necesarios establecidos en el código. El índice se rehízo por completo, porque ahora presenta todos los requisitos para diseño y detallado de los sistemas y miembros estructurales de manera individual en cada capítulo, que, a su vez, sigue el proceso lógico y cronología de diseño y construcción. Por su parte, el título C de la norma NSR-10 sigue la estructuración del ACI-318-08, en la que no hay una organización ligada a la secuencia de diseño por elementos; por el contrario, se mezclan los requerimientos de los elementos estructurales en diversos capítulos a lo largo del reglamento [5].

Con el fin de orientar al ingeniero en el uso de esta nueva estructura del reglamento ACI-318-19 y que tendrá la próxima actualización del reglamento NSR, se elaboraron los mapas de ruta que permitirán identificar de una manera clara la nueva posición y la migración del reglamento NSR-10 al ACI-318-19. Los mapas de ruta se presentan en las figuras 6, 7 y 8.

En diferentes capítulos del reglamento colombiano, se puede evidenciar un impacto aun mayor, como en el capítulo C.9 que dispone los requisitos de resistencia básica y condiciones de funcionamiento para el diseño de elementos de concreto

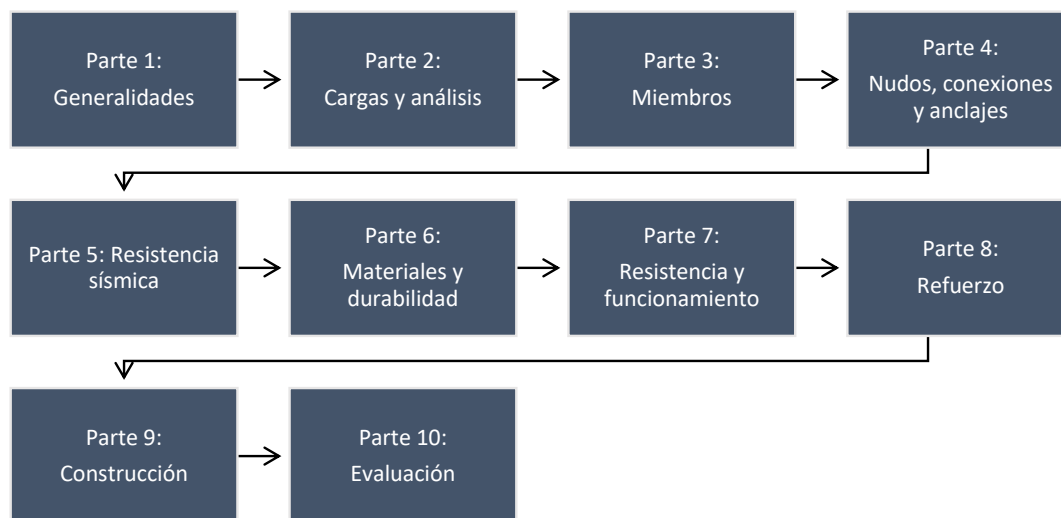


Figura 5. Esquema de organización del reglamento ACI 318-19

Nota. Elaboración propia.

estructural. Su contenido se encuentra en 12 secciones del reglamento ACI 318-19. Lo mismo ocurre con el capítulo C.18 que establece las disposiciones que se deben aplicar para realizar el diseño de diferentes elementos sometidos a flexión o cargas axiales. En él, su contenido se encuentra distribuido en diez secciones del reglamento ACI 318-19. En total, 14 de los 23 capítulos del reglamento NSR-10 presentan cambios en su disposición y contenido con respecto al americano. En otras palabras, poco más

del 60 % de los capítulos del colombiano registran cambios en el aspecto estructural en comparación con el ACI 318-19.

Debido a que la comparación de la organización de las normativas es extensa, el lector puede consultar el resultado completo en el siguiente enlace: www.researchgate.net/publication/360106912_Comparison_between_ACI-318-19_and_NSR-10_for_structural_design_of_concrete_frames_in_high_seismic_hazard_zones

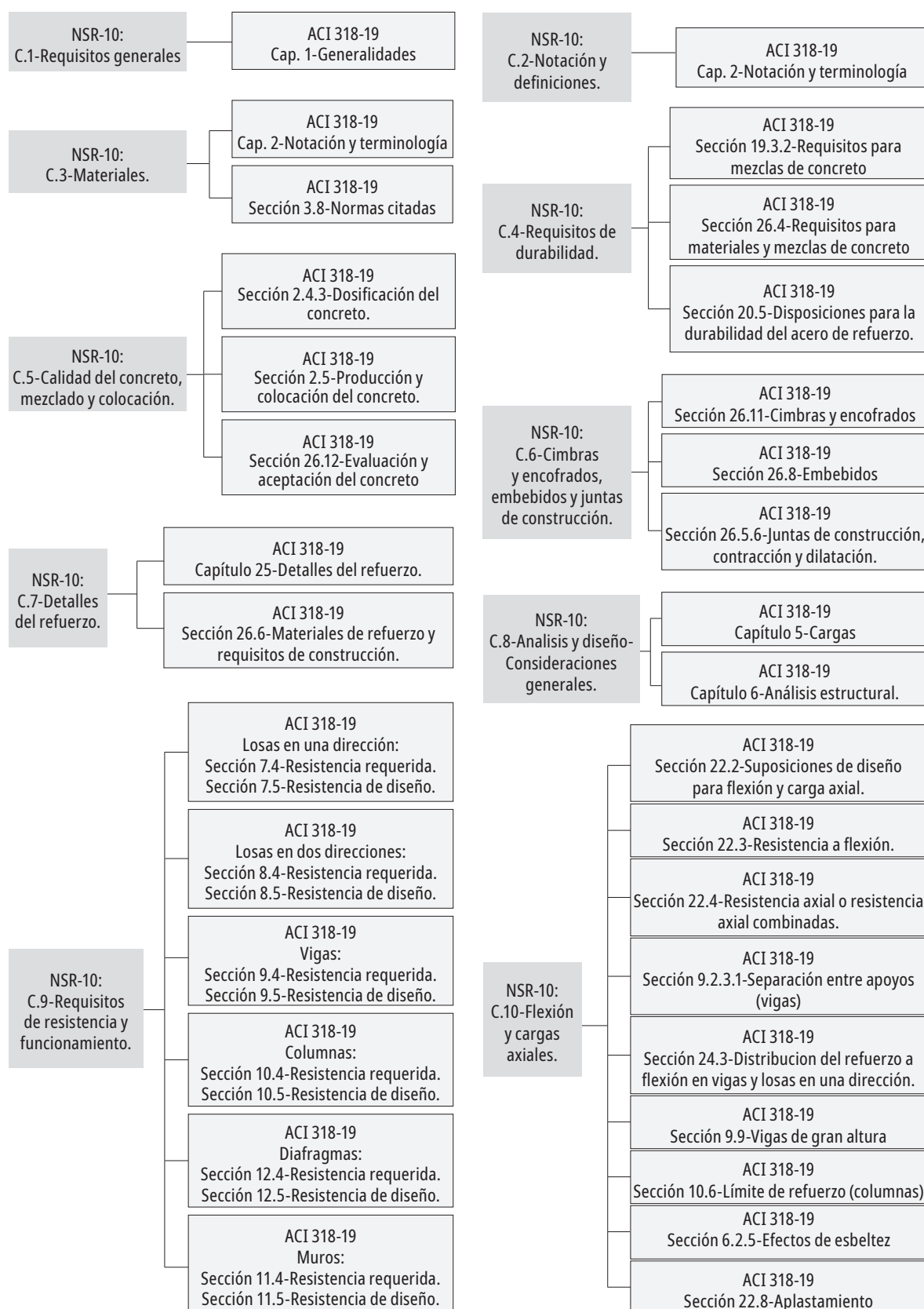


Figura 6. Mapas de ruta de los capítulos C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6, C.7, C.8, C.9 y C.10

Nota. Elaboración propia.

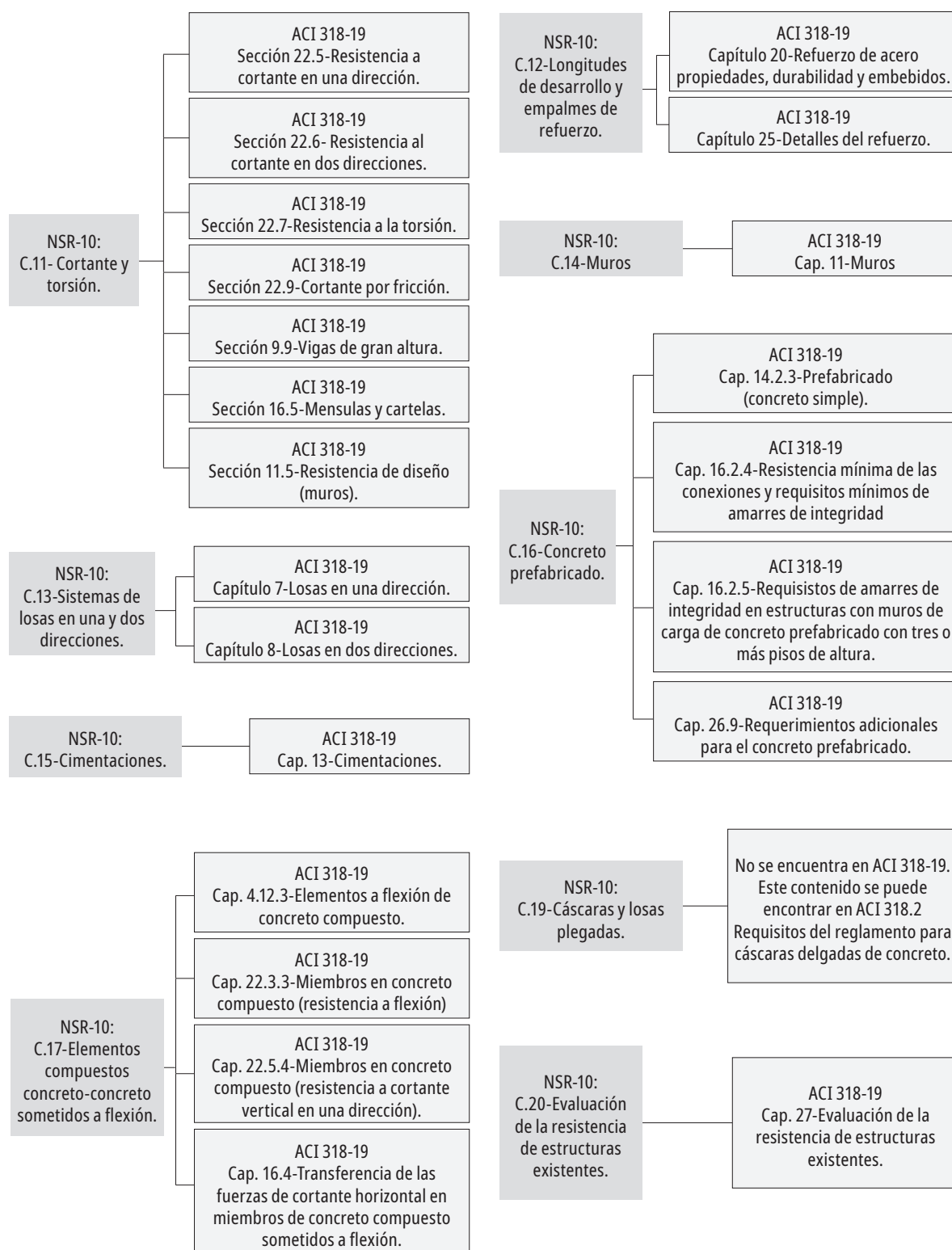


Figura 7. Mapas de ruta de los capítulos C.11, C.12, C.13, C.14, C.15, C.16, C.17, C.19 y C.20

Nota. Elaboración propia.

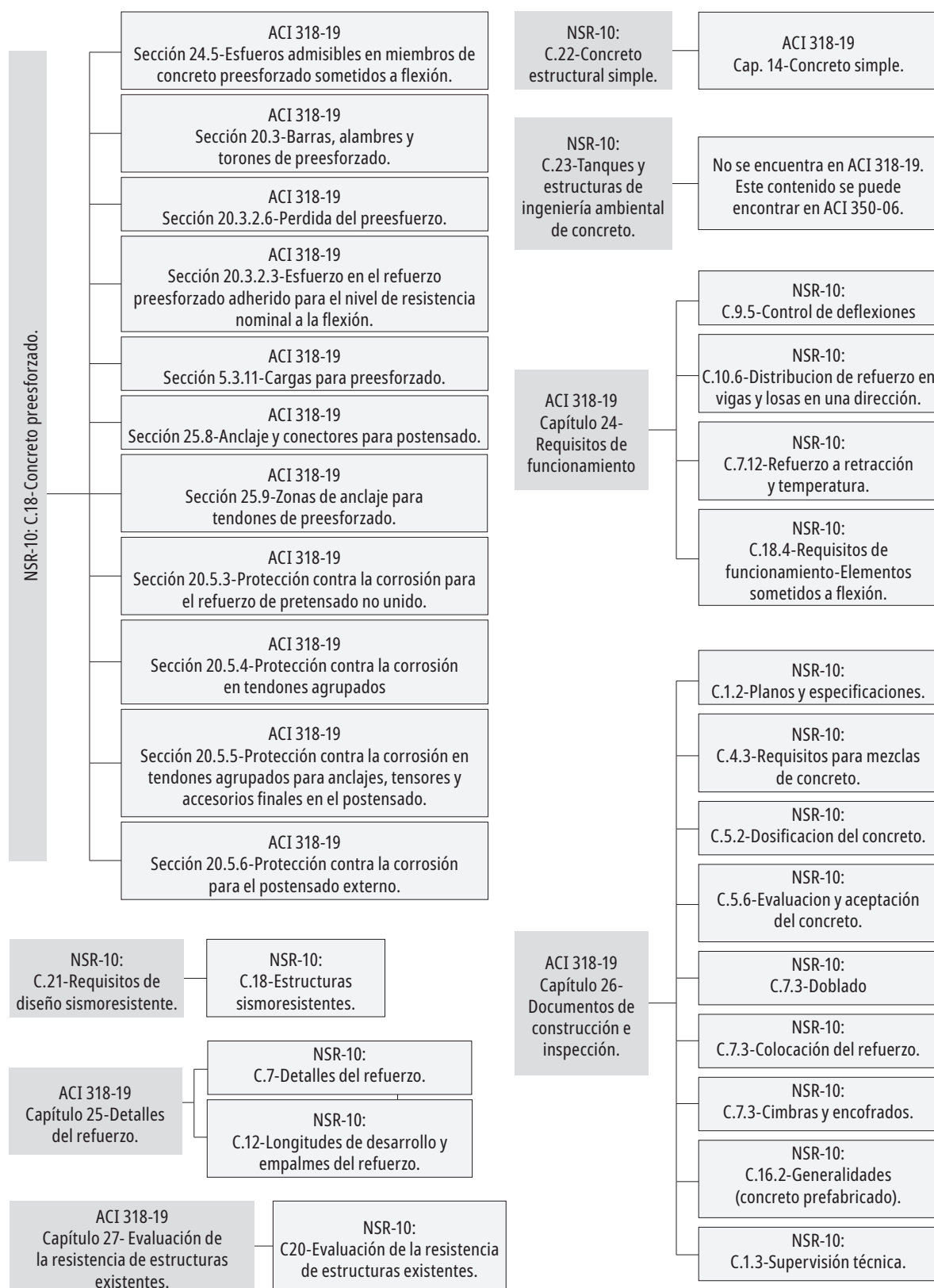


Figura 8. Mapas de ruta de los capítulos C.18, C.21, C.22, C.23, C.24, C.25 y C.26.

Nota. Elaboración propia.

Resultados de la comparación entre las especificaciones sismorresistentes

Dentro de los principales cambios encontrados al realizar la comparación entre los requisitos sismorresistentes establecidos en el capítulo C.21 de la NSR-10 y el capítulo 18 del reglamento ACI 318-19, se destacan los siguientes:

Espaciamiento del refuerzo transversal para vigas DES

La norma NSR-10 en la sección C.21.5.3.2 estipula los requerimientos para determinar el espaciamiento de los estribos cerrados de confinamiento en vigas. Aquí el espaciamiento corresponde al menor valor obtenido al evaluar cuatro criterios:

- 1) $d/4$.
- 2) Ocho veces el diámetro de las barras longitudinales más pequeñas.
- 3) 24 veces el diámetro de la barra de estribo cerrado de confinamiento.
- 4) 300 mm.

Por otra parte, el reglamento ACI 318-19 en la sección 18.6.4.4 modifica el literal (b) cambiando el valor de $8d_b$ a $6d_b$, el valor de 300 mm del literal (d) es ahora 150 mm, elimina el literal (c) y agrega una nueva disposición que determina la separación del refuerzo transversal cuando se implemente acero de refuerzo de alta resistencia (550 MPa). Por tanto, acorde con los nuevos requerimientos establecidos por el reglamento ACI 318-19 en la sección 18.6.4.4 para establecer la separación del refuerzo transversal en vigas, sería el menor valor obtenido después de evaluar los siguientes criterios:

- 1) $d/4$.
- 2) 150 mm.
- 3) Para acero grado 420, $6d_b$ del diámetro de las barras a flexión más pequeñas, excluyendo el refuerzo superficial requerido por 9.7.2.3.
- 4) Para acero grado 550, $5db$ del diámetro de las barras principales a flexión más pequeñas, excluyendo el refuerzo superficial requerido por 9.7.2.3.

De acuerdo con lo establecido en el reglamento ACI 318-19, los límites superiores fueron cambiados debido a la preocupación respecto a si estos espaciamientos inhibían el pandeo de las barras longitudinales y al confinamiento de las vigas de sección grande. Las nuevas consideraciones también disponen un requerimiento para determinar el espaciamiento cuando se utiliza refuerzo de alta resistencia, que tiene una separación más estrecha de los estribos transversales para inhibir el pandeo de la barra longitudinal con esfuerzos axiales más altos. El espaciado máximo en la región del corstante plástico se reduce a $5db$ para el grado 80 en pórticos de momento especiales [4], [6], [7], [8].

Resistencia mínima a flexión en columnas

El código ACI 318-19, en la sección 18.7.3 que incluye los requerimientos de resistencia mínima a flexión de columnas, dispone que las conexiones donde la columna es discontinua por encima de la conexión y la fuerza axial mayorada de compresión P_u en las combinaciones de carga que incluya efectos sísmicos E , sea menor que $A_g f'_c/10$, están exentas de cumplir con los requerimientos de 18.7.3.2 ($\Sigma M_{nc} \geq 6/5 \Sigma M_{nb}$) y 18.7.3.3. Por otro lado, la norma NSR-10 en la sección C.21.6.2, que define las disposiciones para la resistencia mínima a flexión de columnas, no tiene en cuenta este requerimiento.

El reglamento ACI 318-19 lo añadió en razón a que las conexiones que incorporan columnas que no sean continuas por encima de la conexión, como por ejemplo, las conexiones de cubierta, están exentas si la carga axial que soporta la columna es baja. Esto se debe a que las columnas de pórticos especiales resistentes a momento con cargas axiales bajas, son propiamente dúctiles y es poco probable que la fluencia de la columna en esos niveles pueda crear un mecanismo de falla de columnas que conduzca al colapso de la estructura [3].

Cantidad de refuerzo transversal en columnas

La norma NSR-10 en la sección C.21.6.4.4 establece las cantidades para disponer el refuerzo transversal en los incisos (a) y (b) (a menos que en 21.6.5

se exija mayor cantidad de refuerzo), en el inciso (a) establece la cantidad de refuerzo calculada mediante la ecuación (1) (ecuación C.21-6 NSR-10) en virtud de la cuantía volumétrica de refuerzo en espiral o de estribos cerrados de confinamiento circulares ρ_s :

$$\rho_s = 0.12 \frac{f'_c}{f_{yt}} \quad (1)$$

El inciso (b) de C.21.6.4.4 determina que la cantidad de refuerzo transversal se calcula de acuerdo con el área total de la sección transversal del refuerzo de estribos cerrados de confinamiento A_{sh} y no debe ser menor que la requerida por las ecuaciones (2) y (3) (ecuaciones C.21-7 y C.21-8 NSR-10):

$$A_{sh} = 0.3 \frac{s b_c f'_c}{f_{yt}} \left[\left(\frac{A_g}{A_{ch}} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$A_{sh} = 0.09 \frac{s b_c f'_c}{f_{yt}} \quad (3)$$

Por otro lado, el código ACI 318-19 en la sección 18.7.5.4 establece que la cantidad de refuerzo transversal para columnas se calcula según lo establecido en la tabla 1.

De la tabla anterior se pueden definir las siguientes diferencias en cuanto al cálculo de la cantidad de refuerzo transversal para columnas DES: el reglamento ACI 318-19 establece que la

cantidad de refuerzo transversal para columnas depende de dos condiciones:

- 1) $P_u < 0.3 A_g f'_c$ y $f'_c < 70 \text{ MPa}$
- 2) $P_u > 0.3 A_g f'_c$ o $f'_c > 70 \text{ MPa}$

De acuerdo con la situación que se genere, ACI 318-19 plantea ahora tres expresiones para cada condición y no dos como se advierte en la NSR-10, en la que ACI 318-19 agregó las ecuaciones (c) y (f) dentro de la tabla 18.7.5.4, lo cual conduce a que la cantidad de refuerzo transversal en columnas dependa del factor de resistencia de concreto k_f y del factor de efectividad de confinamiento k_n .

Conforme lo establece el reglamento ACI 318-19, las expresiones (c) y (f) de la tabla 18.7.5.4 se implementan con el inicio del comportamiento controlado por compresión, que se da cuando hay cargas axiales mayores de $0.3 A_g f'_c$ aproximadamente. Además, se puede observar que, dentro de las expresiones mencionadas, se utilizan dos términos: 1) k_n disminuye el confinamiento requerido en columnas con refuerzo longitudinal lateralmente soportado y con poco espaciamiento entre barras, debido a que esas columnas están más confinadas que columnas con barras longitudinales espaciadas a una distancia mayor y 2) k_f aumenta el confinamiento requerido en columnas con $f'_c > 70 \text{ MPa}$ debido a que estas pueden presentar una falla frágil si no están bien confinadas.

Tabla 1. Cantidad de refuerzo transversal para columnas (Tabla 18.7.5.4 ACI 318-19)

Refuerzo transversal	Condición	Expresiones aplicables	
$A_{sh}/(s b_c)$ para estribos cerrados de confinamiento rectilíneos	$P_u \leq 0.3 * A_g * f'_c$ y $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$	Mayor de (a) y (b)	$0.3 * \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) * \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (a)
			$0.09 * \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (b)
	$P_u > 0.3 * A_g * f'_c$ o $f'_c > 70 \text{ MPa}$	Mayor de (a), (b) y (c)	$0.2 * k_f * k_n * \frac{P_u}{f_{yt} * A_{ch}}$ (c)
P_s para espirales o estribos cerrados de confinamiento circulares	$P_u \leq 0.3 * A_g * f'_c$ y $f'_c \leq 70 \text{ MPa}$	Mayor de (d) y (e)	$0.45 * \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) * \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (d)
			$0.12 * \frac{f'_c}{f_{yt}}$ (e)
	$P_u > 0.3 * A_g * f'_c$ o $f'_c > 70 \text{ MPa}$	Mayor de (d), (e) y (f)	$0.35 * k_f * \frac{P_u}{f_{yt} * A_{ch}}$ (f)

Fuente: ACI 318-19 (tabla 18.7.5.4).

El límite para el refuerzo de cortante ya no es 420 MPa, ahora se permite la implementación de refuerzo de 550MPa destinado a controlar el ancho de las fisuras inclinadas, que tienden a formarse en elementos de concreto reforzado sometidos a fuerzas cortantes [8], [9].

Fuerza cortante de diseño en muros estructurales especiales

Para la norma NSR-10, en la sección C.21.9.3 las fuerzas de diseño para muros estructurales con capacidad especial de disipación de energía, constan del valor de V_u obtenido del análisis lateral acorde con las combinaciones de mayoración de carga. Por otro lado, el código ACI 318-19 en la sección 18.10.3 dispone que la fuerza de cortante de diseño V_e se calcula teniendo en cuenta el esfuerzo máximo de cortante mayorado V_u , el factor de sobrerresistencia Ω_v y el factor para tener en cuenta la amplificación dinámica de cortante ω_v , que se involucran en la ecuación 18.10.3.1. La NSR-10 no tiene en cuenta la implementación de estos factores para establecer la fuerza de diseño en este tipo de muros, que, en algunos casos puede implicar que la fuerza de diseño ahora podría ser mucho más grande.

Esta nueva provisión para la determinación de las fuerzas cortantes de diseño en muros especiales, surgió de la experiencia de los últimos 15 años con el análisis dinámico no lineal de edificaciones de múltiples proyectos de muros estructurales, que indicó que las fuerzas de diseño por cortante para los muros podrían ser amplificadas por una sobrerresistencia propia del muro en la sección crítica donde se espera la fluencia del refuerzo longitudinal, además de una amplificación dinámica del cortante debida a los efectos de los modos de vibración altos [5].

Esta consideración es relevante para la futura versión del reglamento nacional, debido al creciente auge de construcciones que usan sistemas estructurales de muros delgados o de ductilidad limitada, que han demostrado inadecuada capacidad de resistencia sísmica y fallas por pandeo. A escala nacional es aconsejable que el uso de estos

sistemas de muros delgados o industrializados se restrinja a edificaciones de muy baja altura y se consideren espesores mínimos de muros en función de la altura, se incluya la restricción o por lo menos se limite el uso de mallas electrosoldadas como refuerzo a flexión o cortante y se exija la necesaria adición de elementos de borde en muros pertenecientes al sistema primario de resistencia sísmica [10], [11].

Todos los cambios encontrados en la comparación entre NSR-10 y ACI-318-19, que se omiten aquí debido a lo extensa que resulta la comparación, pueden consultarse en el siguiente enlace: https://www.researchgate.net/publication/360106912_Comparison_between_ACI-318-19_and_NSR-10_for_structural_design_of_concrete_frames_in_high_seismic_hazard_zones

Resultados obtenidos de la comparación del diseño estructural usando NSR-10 vs. ACI-318-19

Para analizar el impacto que tendrán los cambios en las especificaciones para el diseño de los elementos estructurales pertenecientes a estructuras de pórticos de concreto con capacidad especial de disipación de energía, se elaboraron los diseños estructurales usando los requerimientos de la NSR-10 y del ACI-318-19, con lo cual se calcularon las cantidades de acero de refuerzo (Kg) y de volumen concreto (m³) de vigas y columnas, para luego, según los precios unitarios de mercado estimar el costo usado en los materiales de las dos alternativas y, al final, comparar los costos para determinar el impacto porcentual de costos aproximados.

Al cuantificar las cantidades de acero de refuerzo (kg) y de volumen de concreto (m³) en cada diseño, hay que resaltar que al obtener secciones iguales tanto en vigas, columnas y viguetas, la cantidad de concreto en cada alternativa es la misma. Caso contrario sucede con las cantidades de acero de refuerzo, en donde el uso de los requerimientos del ACI 318-19 demandó mayor cantidad de acero de refuerzo. En las tablas 2 y 3 se muestran las cantidades de materiales calculados.

Tabla 2. Cantidad de acero de refuerzo obtenida

Cantidad de acero de refuerzo	
NSR-10	33 934 Ton
ACI 318-19	36 664 Ton
Diferencia:	7.4 %

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3. Cantidad de concreto obtenida

Cantidad de concreto	
NSR-10	623 823 m ³
ACI 318-19	623 823 m ³
Diferencia:	0.0 %

Nota. Elaboración propia.

Después, con las cantidades obtenidas y con ayuda de la base de datos del Invías, con la que se determinó el costo unitario del acero de refuerzo y del concreto, se calculó el costo de los materiales para cada alternativa. La tabla 4 muestra, de acuerdo con las bases de datos investigadas, el costo unitario de cada material.

Tabla 4. Costos aproximados de materiales usando NSR-10 y ACI 318-19

Un	Materiales	COP	USD
Kg	Acero PDR-60	4650	1.23
m ³	Concreto f'c 21 MPa	369 000	97.72
m ³	Concreto f'c 28 MPa	424 600	112.38

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, con las cantidades calculadas y los costos unitarios de los materiales ya establecidos, es posible saber el costo total de materiales para cada diseño y deducir la diferencia en porcentaje en los costos correspondientes de cada alternativa. Los resultados se sintetizan en la tabla 5.

Tabla 5. Costos aproximados de materiales usando NSR-10 y ACI-318-19

Costos		
NSR-10	\$ 387 983 787 COP	\$ 102 749,94 USD
ACI 318-19	\$ 400 678 287 COP	\$ 106 111,83 USD
Diferencia:	3.3 %	

Nota. Elaboración propia.

De los resultados obtenidos en la tabla 5, se puede observar que con la implementación de los requerimientos del ACI-318-19, se genera un aumento del 3.3 % en los costos totales de los materiales requeridos. Esta diferencia se debe a que el ACI-318-19 demanda mayor cantidad de acero de refuerzo, sobre todo, en el acero de refuerzo transversal para resistir los cortantes de diseño.

Conclusiones

Del trabajo realizado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En cuanto al orden, disposición y contenido de los capítulos que conforman cada normativa, se pudo evidenciar un sustancial cambio en su organización. El reglamento ACI 318-19 está dividido en diez partes que permiten al lector encontrar con mayor facilidad el elemento estructural de diseño de interés. Además, la filosofía de organización del reglamento ACI 318-19 tiene como objetivo presentar todos los requisitos para diseño y el detalle de los sistemas y miembros estructurales de manera individual en cada capítulo, que, a su vez, sigue el proceso y cronología de diseño y construcción. Por otro lado, la norma NSR-10 no implementa una filosofía de organización por elementos.
- El reglamento ACI 318-19 dedica la parte 3 exclusivamente a los miembros estructurales y los separa por medio de capítulos independientes, en los cuales, puntualiza las consideraciones necesarias para el análisis y diseño de cada elemento estructural. A su turno la norma NSR-10 enfoca una temática o fenómeno de estudio específico dentro del contenido de cada capítulo, en el que, relaciona las condiciones necesarias que abordan el fenómeno estudiado con el tipo de elemento o sistema estructural.
- En cuanto a la comparación de especificaciones para el diseño sismorresistente, la norma NSR-10 define que un elemento estructural se comporta como viga o columna, entre otros aspectos, dependiendo de si la carga axial máxima a compresión P_u es mayor o menor que $A_g f'_c / 10$. Por otra parte, el reglamento ACI 318-19

incorpora dentro los requisitos para cada elemento estructural, consideraciones especiales que se deben tener en cuenta si ese elemento posee una carga P_u mayor o menor que $Agf'_c/10$ (dependiendo del caso). El código ACI 318-19 no genera la necesidad de remitirse a varios capítulos externos para el diseño de una viga o una columna puesto que la totalidad de los requisitos de diseño se encuentra en el capítulo correspondiente al elemento.

- La incorporación de refuerzo de alta resistencia (690MPa o grado 100 y 550MPa o grado 80) se podría considerar como el cambio que tuvo mayor impacto en la actualización del ACI 318-19, debido a que repercutió en la mayoría de los capítulos de este reglamento. Para los pórticos resistentes a momento con capacidad especial de disipación de energía, ahora se permite utilizar acero de refuerzo de 550 MPa como máximo, y para muros estructurales especiales, se establece el límite máximo para la resistencia del acero de refuerzo en 690MPa. En consecuencia, en la comparación de los capítulos analizados entre la norma NSR-10 y el reglamento ACI 318-19 en las especificaciones que abordaban los requisitos para el acero de refuerzo, en la normativa colombiana era una constante que no se contemplaran requerimientos en la implementación de acero de refuerzo de alta resistencia, bien sea de 550MPa o 690MPa, como sí se hace en el reglamento ACI 318-19.
- El principal factor que influyó en las cantidades de materiales obtenidas del diseño de ambas alternativas, fueron los cambios en los requerimientos para el refuerzo transversal tanto en vigas como en columnas. Sin embargo, al analizar la diferencia en los costos de los materiales, un aumento del 3.3 % en los costos, con el uso de los requerimientos del ACI-318-19 no es un impacto significativo, si se tiene en cuenta el aumento de la capacidad y la ductilidad que se proveerá al sistema estructural. Por tanto, es esperable que la incorporación de tales consideraciones a la normatividad colombiana no genere ningún impacto de trascendencia en el costo de la estructura.

Referencias

- [1] L. García, “Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición”, *Rev. Universidad de los Andes*, vol. 41, pp. 71-77, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i41.785>
- [2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, “Título C de la NSR-10” En Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes. 2010. <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- [3] M. M. Arcila Rivera, Eds., *Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia*, vol. 43. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2020.
- [4] American Concrete Institute. *Building Code Requirements for Structural Concrete*, ACI 318-19, 2019.
- [5] J. Moehle, Key Changes in the 2019. Edition of the ACI Building Code (ACI 318-19). *Concrete International*, vol. 41, n.º 8, pp. 21-21, 2019.
- [6] R. Sharma, K. Nemati, J. Valigura, N. Warner, C. Chen, *High Strength Reinforcement for Seismic Applications in ACI, 318-19*, 2020. <https://www.structuremag.org/?p=15763#respond>
- [7] A. Trygestad, *Code Update: ACI 318: High-Strength Reinforcing Bars*, 2017. <https://informedinfrastructure.com/33260/code-update-aci-318-high-strength-reinforcing-bars/>
- [8] D. Kuchma, S. Wei, D. Sanders, A. Belarbi y L. Novak, “Development of the One-Way Shear Design Provisions of ACI 318-19 for Reinforced Concrete”, *ACI Struct. J.*, vol. 116, n.º 4, pp. 285-295, 2019, DOI: 10.14359/51716739
- [9] Y. Ou, H. Alrasyid, N. Nguyen, Minimum Shear Reinforcement for Columns with High-Strength Reinforcement and Concrete, *Journal of Structural Engineering*, vol. 147, n.º 2, pp. 04020313-1 - 04020313-13, 2021, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002854](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002854)
- [10] Z. Shan, D. Looi, B. Cheng, R. Su, “Simplified Seismic Axial Collapse Capacity Prediction Model for Moderately Compressed Reinforced Concrete Shear Walls Adjacent to Transfer Structure in Tall Buildings”, *Rev. Struct Design Tall Spec Build*, vol. 29, pp. 1-21, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.1752>
- [11] C. Arteta, C. Blandón, R. Bonett y J. Carrillo, *Estudio del comportamiento sísmico de edificios de muros delgados de concreto reforzado*. <http://www.ceer.co/ceer-estudio-de-edificios-de-muros-delgados-con-recomendaciones-enviado/>

