

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE VIGAS DE CONCRETO  
REFORZADO SEGÚN LA NSR-10 Y EL ACI 318 EN COLOMBIA



HEBLER ERNESTO CASTELLANOS HERNÁNDEZ  
SEBASTIÁN CAMILO GAMBA BOHÓRQUEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2026

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE VIGAS DE CONCRETO  
REFORZADO SEGÚN LA NSR-10 Y EL ACI 318 EN COLOMBIA

HEBLER ERNESTO CASTELLANOS HERNÁNDEZ  
SEBASTIÁN CAMILO GAMBA BOHÓRQUEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Estructuras

Asesor

Ing. Mg. JHONATAN AUGUSTO FORERO PABÓN

Ingeniero Civil

Magíster en Ingeniería Civil en Gerencia de la Construcción

Magíster en Cálculo de Obras Civiles

Magíster en Ingeniería – Estructuras

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
VILLAVICENCIO

2026

**Autoridades Académicas**

**P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O. P.**

Rector General

**P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O. P.**

Vicerrector Académico General

**P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O. P.**

Rector Seccional Villavicencio

**P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O. P.**

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

**Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN**

Secretaria General Seccional Villavicencio

**Mg. Luis Fernando DÍAZ CRUZ**

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

### **Dedicatorias**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi familia, por ser el pilar fundamental en mi vida y en mi proceso de formación. Su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante han sido clave para alcanzar este logro.

A mis padres, por sus enseñanzas, valores y esfuerzo, que me han permitido llegar hasta este punto. A cada uno de mis seres queridos, quienes han estado presentes brindándome ánimo en los momentos difíciles y celebrando cada avance.

De igual manera, dedico este logro a todas las personas que han contribuido a mi crecimiento personal y profesional, acompañándome y creyendo en mis capacidades.

Finalmente, este trabajo representa el resultado del esfuerzo, la dedicación y el compromiso que he asumido con mi formación, y es un paso importante en la construcción de mi futuro como profesional.

***Hebler Ernesto Castellanos Hernández***

A mis amados padres, cimientos eternos de mi ser, pilares que sostienen mis sueños. En las tormentas de la vida y los retos de mi camino como ingeniero civil, su amor incondicional ha sido el refugio y la fuerza que me impulsa. Con gratitud infinita, les dedico esta obra, fruto de su fe inquebrantable en mi carrera, mi profesión y mi esencia. Son el latido más puro de mi corazón.

***Sebastián Camilo Gamba Bohórquez***

### **Agradecimientos**

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado, el Ingeniero Jhonatan Augusto Forero Pabón, por su orientación, disposición y acompañamiento constante durante el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos, recomendaciones y apoyo fueron fundamentales para la consolidación de este trabajo.

A la Universidad Santo Tomás, por brindarnos una formación académica integral y de calidad, así como por proporcionarnos las herramientas necesarias para nuestro crecimiento profesional y personal.

De igual manera, agradecemos a nuestros docentes, compañeros y a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron directa o indirectamente en la realización de este estudio, ya sea a través de sus conocimientos, apoyo o motivación.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su respaldo incondicional, comprensión y confianza, los cuales fueron esenciales para culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

.

## Contenido

|                                                                             | Pág. |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| Resumen .....                                                               | 12   |
| Abstract.....                                                               | 13   |
| Glosario.....                                                               | 14   |
| Introducción.....                                                           | 17   |
| 1. Planteamiento del Problema .....                                         | 18   |
| 1.1 Contexto del Diseño Estructural en Colombia.....                        | 18   |
| 1.2 Relación entre la NSR-10 y el ACI 318.....                              | 18   |
| 1.3 Diferencias Normativas en el Diseño de Vigas de Concreto Reforzado..... | 18   |
| 1.4 Necesidad del Análisis Comparativo .....                                | 19   |
| 1.5 Formulación del Problema .....                                          | 20   |
| 2. Justificación .....                                                      | 21   |
| 2.1 Importancia Técnica del Estudio.....                                    | 21   |
| 2.2 Relevancia en la Práctica Profesional .....                             | 21   |
| 2.3 Pertinencia en el Contexto Colombiano.....                              | 22   |
| 3. Objetivos.....                                                           | 23   |
| 3.1 Objetivo General .....                                                  | 23   |
| 3.2 Objetivos Específicos.....                                              | 23   |
| 4. Marco Teórico .....                                                      | 24   |
| 4.1 Fundamentos del Concreto Reforzado .....                                | 24   |
| 4.1.1 Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado. ....                  | 24   |
| 4.1.2 Estados Límite en el Diseño Estructural. ....                         | 25   |
| 4.2 Filosofía de Diseño por Resistencia .....                               | 26   |
| 4.2.1 Conceptos Generales del Diseño por Resistencia. ....                  | 26   |
| 4.2.2 Aplicación en NSR-10 y ACI 318.....                                   | 27   |
| 4.3 Diseño a Flexión en Vigas de Concreto Reforzado .....                   | 28   |
| 4.3.1 Comportamiento a Flexión. ....                                        | 28   |
| 4.3.2 Comportamiento a Flexión. ....                                        | 29   |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.3 Comparación NSR-10 vs ACI 318 en Flexión. ....                             | 30 |
| 4.4 Diseño a Cortante en Vigas de Concreto Reforzado .....                       | 31 |
| 4.4.1 Comportamiento del Cortante. ....                                          | 31 |
| 4.4.2 Criterios de Diseño a Cortante. ....                                       | 32 |
| 4.4.3 Comparación NSR-10 vs ACI 318 en Cortante. ....                            | 32 |
| 4.5 Detallado Estructural en Vigas.....                                          | 33 |
| 4.5.1 Requisitos de Detallado. ....                                              | 33 |
| 4.5.2 Diseño sismorresistente. ....                                              | 34 |
| 4.5.3 Comparación NSR-10 vs ACI 318 en Detallado.....                            | 35 |
| 4.6 Consideraciones del Contexto Colombiano .....                                | 36 |
| 4.6.1 Amenaza sísmica en Colombia.....                                           | 36 |
| 4.6.2 Aplicación de normativa internacional.....                                 | 36 |
| 4.6.3 Antecedentes y Estado del Arte en la Práctica Comparativa de Códigos ..... | 37 |
| 5. Metodología.....                                                              | 39 |
| 5.1 Enfoque y Tipo de Investigación .....                                        | 39 |
| 5.2 Alcance de la Investigación.....                                             | 39 |
| 5.3 Normativa de referencia .....                                                | 39 |
| 5.3.1 Norma NSR-10. ....                                                         | 39 |
| 5.3.2 Código ACI 318. ....                                                       | 39 |
| 5.4 Definición del caso de estudio .....                                         | 40 |
| 5.4.1 Geometría de la Viga. ....                                                 | 40 |
| 5.4.2 Propiedades de los Materiales. ....                                        | 40 |
| 5.4.3 Condiciones de Carga. ....                                                 | 40 |
| 5.5 Procedimiento de Diseño Estructural.....                                     | 40 |
| 5.5.1 Diseño según NSR-10 .....                                                  | 41 |
| 5.5.2 Diseño ACI 318 .....                                                       | 41 |
| 5.6 Variables de Comparación. ....                                               | 41 |
| 5.6.1 Variables de Diseño.....                                                   | 41 |
| 5.6.2 Variables de Desempeño .....                                               | 42 |
| 5.7 Análisis de Resultados .....                                                 | 42 |
| 5.8 Definición de la Viga Tipo.....                                              | 42 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.8.1 Predimensionamiento y Requisitos Geométricos Mínimos de la Viga .....                       | 42 |
| 5.8.2 Propiedades de los Materiales .....                                                         | 43 |
| 5.8.3 Cargas Actuantes. ....                                                                      | 43 |
| 5.8.4 Combinación de Carga Crítica. ....                                                          | 43 |
| 5.8.5 Esfuerzos de Diseño .....                                                                   | 43 |
| 6. Diseño de la Viga.....                                                                         | 45 |
| 6.1 Diseño a Flexión de la Viga Según NSR-10 .....                                                | 45 |
| 6.1.1 Datos de Diseño.....                                                                        | 45 |
| 6.1.2 Ecuación de Diseño por Resistencia.....                                                     | 45 |
| 6.1.3 Momento Nominal Requerido. ....                                                             | 45 |
| 6.1.4 Expresión del Momento Nominal.....                                                          | 45 |
| 6.1.5 Resultado del acero requerido .....                                                         | 46 |
| 6.1.6 Verificación de cuantía mínima.....                                                         | 46 |
| 6.1.7 Verificación de cuantía máxima. ....                                                        | 46 |
| 6.1.8 Selección de refuerzo comercial.....                                                        | 46 |
| 6.2 Diseño a cortante de la viga según NSR-10.....                                                | 46 |
| 6.2.1 Datos de Diseño.....                                                                        | 46 |
| 6.2.2 Aporte Nominal de Cortante del Concreto ( $V_c$ ).....                                      | 47 |
| 6.2.3 Acero de refuerzo requerido por cortante ( $V_s$ ).....                                     | 47 |
| 6.3 Diseño a flexión de la viga según ACI318.....                                                 | 47 |
| 6.3.1 Datos de Diseño.....                                                                        | 47 |
| 6.3.2 Ecuación de Diseño por Resistencia.....                                                     | 48 |
| 6.3.3 Momento Nominal Requerido. ....                                                             | 48 |
| 6.3.4 Expresión del Momento Nominal.....                                                          | 48 |
| 6.3.5 Resultado del Acero Requerido.....                                                          | 48 |
| 6.3.6 Verificación de Cuantía Mínima .....                                                        | 49 |
| 6.3.7 Selección de Refuerzo Comercial.....                                                        | 49 |
| 6.3.8 Verificación de la Deformación Neta de Tracción ( $\epsilon_t$ ) y del Factor $\phi$ . .... | 49 |
| 6.4 Diseño a Cortante de la Viga Según ACI 318.....                                               | 49 |
| 6.4.1 Datos de Diseño.....                                                                        | 49 |
| 6.4.2 Aporte Nominal de Cortante del Concreto ( $V_c$ ).....                                      | 50 |

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.4.3 Acero de Refuerzo Requerido por Cortante ( $V_s$ ) .....                                                                             | 50 |
| 6.4.4 Separación de Estribos .....                                                                                                         | 50 |
| 6.4.5 Separaciones Máximas Permitidas y Umbral de Fatiga Diagonal .....                                                                    | 50 |
| 6.5 Comparación entre NSR-10 y ACI 318 .....                                                                                               | 51 |
| 6.5.1 Comparación de Resultados Numéricos.....                                                                                             | 51 |
| 6.5.2 Análisis Técnico .....                                                                                                               | 52 |
| 6.6 Diseño a Flexión de las Vigas que Soportan Particiones Frágiles Susceptibles a Dañarse Debido a Deflexiones Grandes Según NSR-10 ..... | 55 |
| 6.6.1 Predimensionamiento y Requisitos Geométricos Mínimos de la Viga. ....                                                                | 55 |
| 6.6.2 Datos de Diseño.....                                                                                                                 | 55 |
| 6.6.3 Ecuación de Diseño por Resistencia.....                                                                                              | 55 |
| 6.6.4 Momento Nominal Requerido. ....                                                                                                      | 55 |
| 6.6.5 Expresión del momento nominal.....                                                                                                   | 56 |
| 6.6.6 Resultado del Acero Requerido.....                                                                                                   | 56 |
| 6.6.8 Verificación de Cuantía Mínima. ....                                                                                                 | 56 |
| 6.6.9 Verificación de Cuantía Máxima.....                                                                                                  | 56 |
| 6.6.10 Selección de Refuerzo Comercial. ....                                                                                               | 56 |
| 6.7 Diseño a Cortante de la Viga Según NSR-10 .....                                                                                        | 57 |
| 6.7.1 Datos de diseño.....                                                                                                                 | 57 |
| 6.7.2 Aporte Nominal de Cortante Del Concreto ( $V_c$ ).....                                                                               | 57 |
| 6.7.3 Acero de Refuerzo Requerido por Cortante ( $V_s$ ) .....                                                                             | 57 |
| 6.8 Comparación entre Viga que Soportan Particiones Frágiles Nsr-10 y Viga Calculada Anteriormente con ACI 318.....                        | 58 |
| 6.8.1 Comparación de Resultados Numéricos.....                                                                                             | 58 |
| 6.8.2 Análisis Técnico Comparativo (Viga Ajustada NSR-10 vs. Viga Convencional ACI 318.....                                                | 59 |
| 7. Discusión de Resultados .....                                                                                                           | 61 |
| 7.1 Análisis Comparativo General .....                                                                                                     | 61 |
| 7.1.1 Discusión del Predimensionamiento. ....                                                                                              | 62 |
| 7.1.2 Discusión del Diseño a Flexión .....                                                                                                 | 63 |
| 7.1.3 Discusión del diseño a cortante .....                                                                                                | 63 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1.4 Influencia del Contexto Colombiano.....                               | 65 |
| 7.1.5 Evaluación de la Eficiencia Estructural.....                          | 66 |
| 7.1.6 Alcances y Limitaciones del Estudio. ....                             | 67 |
| 7.1.7 Implicaciones para la práctica profesional .....                      | 68 |
| 8. Conclusiones.....                                                        | 70 |
| 8.1 Equivalencia Conceptual y Adaptación Sísmica Local.....                 | 70 |
| 8.2 Impacto del Predimensionamiento y Control de Deflexiones.....           | 70 |
| 8.3 Homologación Analítica en el Diseño a Flexión .....                     | 70 |
| 8.4 Rigidez Paramétrica en el Diseño a Cortante.....                        | 71 |
| 8.5 Complejidad Constructiva y el Factor de Obra .....                      | 71 |
| 8.6 Evaluación de la Eficiencia Estructural y Viabilidad Económica.....     | 71 |
| 8.7 Impacto del Artículo C.11.4.5.3 en el Detallado Transversal .....       | 72 |
| 8.8 Efecto de los Escenarios de Servicio y Particiones Frágiles (L/12)..... | 72 |
| 8.9 Viabilidad Constructiva y Criterio Profesional .....                    | 72 |
| 8.10 Rol del Criterio Técnico en la Ingeniería Nacional.....                | 73 |
| Referencias .....                                                           | 74 |

**Lista de Tablas**

Pág.

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Comparación de resultados numéricos ..... | 51 |
| Tabla 2. Comparación de Resultados Numéricos ..... | 58 |

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo del diseño estructural de vigas de concreto reforzado, empleando la normativa colombiana NSR-10 y el código internacional ACI 318, con el fin de identificar similitudes, diferencias y sus implicaciones en el contexto de la ingeniería estructural en Colombia. Para ello, se analizan los principales criterios de diseño, incluyendo combinaciones de carga, factores de reducción de resistencia, cuantías mínimas y máximas de refuerzo, verificación a flexión y cortante, así como requisitos de detallado estructural.

La metodología adoptada consiste en el diseño de una viga tipo bajo condiciones geométricas y de carga previamente definidas, aplicando de manera independiente cada normativa. Posteriormente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en términos de área de acero requerida, distribución del refuerzo, control de esfuerzos y cumplimiento de los estados límite.

Los resultados evidencian diferencias en los procedimientos y exigencias de diseño, especialmente en lo relacionado con los criterios de seguridad estructural, el tratamiento del cortante y los requisitos asociados al diseño sismorresistente. En este sentido, se observa que la NSR-10 incorpora consideraciones específicas derivadas del contexto sísmico colombiano, lo cual influye en el dimensionamiento y detallado de los elementos estructurales.

Se concluye que, si bien ambas normativas comparten una base conceptual común sustentada en el diseño por resistencia, las particularidades de la NSR-10 generan variaciones relevantes en el diseño final de las vigas, destacando la importancia de su aplicación adecuada en el ámbito nacional.

**Palabras Clave:** concreto reforzado, vigas, NSR-10, ACI 318, diseño estructural, análisis comparativo, diseño sismorresistente.

### Abstract

This study aims to perform a comparative analysis of the structural design of reinforced concrete beams using the Colombian code NSR-10 and the international standard ACI 318, in order to identify similarities, differences, and their implications within the context of structural engineering practice in Colombia. The main design criteria are examined, including load combinations, strength reduction factors, minimum and maximum reinforcement ratios, flexural and shear design, as well as detailing requirements.

The adopted methodology consists of designing a representative beam under predefined geometric and loading conditions, applying each code independently. Subsequently, the results are compared in terms of required steel area, reinforcement distribution, stress control, and compliance with limit states.

The findings reveal differences in design procedures and requirements, particularly regarding structural safety criteria, shear design approach, and seismic design provisions. In this regard, NSR-10 incorporates specific considerations derived from the Colombian seismic context, which directly influence the final design and detailing of structural elements.

It is concluded that, although both codes share a common conceptual basis based on strength design principles, the particular adaptations included in NSR-10 lead to relevant variations in beam design, highlighting the importance of its proper application in the national context.

**Key Words:** reinforced concrete, beams, NSR-10, ACI 318, structural design, comparative analysis, seismic design.

## Glosario

**ACI 318:** Código internacional desarrollado por el American Concrete Institute que establece criterios para el análisis y diseño de estructuras de concreto reforzado, utilizado como referencia técnica a nivel mundial y base para múltiples normativas, incluida la NSR-10.

**Acero de refuerzo:** Barras de acero corrugado embebidas en el concreto, destinadas a resistir esfuerzos de tracción, mejorar la ductilidad y controlar la fisuración en los elementos estructurales.

**Anclaje:** Disposición del refuerzo que garantiza la adecuada transferencia de esfuerzos entre el acero y el concreto, evitando el deslizamiento de las barras.

**Capacidad resistente:** Capacidad resistente: Valor máximo de carga o esfuerzo que un elemento estructural puede soportar antes de alcanzar el estado límite último, de acuerdo con los criterios de diseño por resistencia.

**Carga muerta:** Peso propio de la estructura y de todos los elementos permanentes que la componen, incluyendo acabados y elementos fijos.

**Carga sísmica:** Fuerzas inducidas en la estructura como consecuencia de movimientos sísmicos, consideradas de manera especial en el diseño sismorresistente según la NSR-10.

**Carga viva:** Cargas variables asociadas al uso, ocupación y operación de la estructura.

**Combinación de cargas:** Agrupación de diferentes tipos de cargas, afectadas por factores de mayoración, utilizadas para evaluar las condiciones más desfavorables de diseño.

**Concreto reforzado:** Material compuesto por concreto y acero de refuerzo que actúan de manera conjunta para resistir esfuerzos de compresión y tracción, conforme a los lineamientos de la NSR-10 y el ACI 318.

**Cortante:** Esfuerzo interno que actúa de manera paralela a la sección transversal de un elemento estructural, pudiendo generar fallas por tracción diagonal.

**Cuantía de refuerzo ( $\rho$ ):** Relación entre el área de acero de refuerzo y el área efectiva de la sección de concreto, utilizada como parámetro de diseño estructural.

**Cuantía máxima:** Límite superior de acero permitido en un elemento estructural, establecido para asegurar un comportamiento dúctil y evitar fallas por aplastamiento del concreto.

**Cuantía mínima:** Cantidad mínima de acero exigida por la normativa para prevenir fallas frágiles y garantizar el control de la fisuración.

**Deflexión:** Desplazamiento vertical que experimenta un elemento estructural bajo la acción de cargas, controlado en los estados límite de servicio.

**Diseño por resistencia:** Metodología de diseño estructural que compara la resistencia reducida del elemento (mediante factores  $\phi$ ) con las cargas mayoradas.

**Diseño sismorresistente:** Enfoque de diseño que busca garantizar un comportamiento adecuado de la estructura ante eventos sísmicos, priorizando la ductilidad, la disipación de energía y la prevención del colapso.

**Ductilidad:** Capacidad de un material o elemento estructural para experimentar deformaciones inelásticas significativas antes de fallar.

**Estado límite:** Condición a partir de la cual un elemento estructural deja de cumplir con los requisitos de seguridad (estado límite último) o funcionalidad (estado límite de servicio).

**Falla dúctil:** Tipo de falla estructural precedida por grandes deformaciones, lo que permite advertir el colapso.

**Falla frágil:** Falla que ocurre de manera súbita, sin deformaciones previas significativas, considerada indeseable en el diseño estructural.

**Fisuración:** Aparición de grietas en el concreto debido a esfuerzos de tracción, efectos de retracción o cargas externas.

**Flexión:** Solicitación estructural que produce la curvatura de un elemento como resultado de la acción de cargas transversales.

**Fuerza cortante (V):** Resultante de fuerzas internas que tienden a producir deslizamiento entre secciones adyacentes de un elemento estructural.

**Longitud de desarrollo:** Longitud requerida para que una barra de acero alcance su capacidad de adherencia y pueda transmitir esfuerzos al concreto de manera efectiva.

**Momento flector (M):** Magnitud que representa la tendencia de una carga a producir rotación o curvatura en un elemento estructural.

**NSR-10:** Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente que establece los requisitos obligatorios para el diseño, construcción y supervisión de edificaciones en Colombia.

**Refuerzo longitudinal:** Acero dispuesto a lo largo del eje del elemento estructural, encargado principalmente de resistir los esfuerzos de flexión.

**Refuerzo transversal (estribos):** Acero dispuesto perpendicular o inclinado al eje del elemento, utilizado para resistir esfuerzos cortantes, controlar la fisuración diagonal y confinar el

concreto.

**Resistencia a la compresión del concreto ( $f'_c$ ):** Valor máximo de esfuerzo que puede soportar el concreto bajo carga de compresión, determinado mediante ensayos normalizados.

**Resistencia de fluencia del acero ( $f_y$ ):** Esfuerzo a partir del cual el acero presenta deformaciones plásticas significativas.

**Sección crítica:** Zona de un elemento estructural donde se presentan los mayores esfuerzos y que controla el diseño.

**Viga:** Elemento estructural horizontal diseñado para resistir principalmente esfuerzos de flexión y cortante, transfiriendo cargas hacia los apoyos.

## Introducción

El diseño estructural de vigas de concreto reforzado constituye un componente esencial en la ingeniería civil, dado que estos elementos desempeñan un papel fundamental en la transmisión de cargas y en la estabilidad global de las edificaciones. Su adecuado dimensionamiento y detallado garantizan no solo el cumplimiento de los requisitos de resistencia, sino también condiciones de servicio y desempeño estructural, especialmente en zonas de amenaza sísmica como Colombia.

En el contexto nacional, el diseño de estructuras de concreto reforzado se rige por la Norma Sismo Resistente NSR-10, la cual establece los criterios obligatorios para el análisis, diseño y construcción de edificaciones, incorporando consideraciones específicas relacionadas con el comportamiento sísmico (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010). Por su parte, el ACI 318 es un referente internacional ampliamente reconocido que define lineamientos técnicos para el diseño de estructuras de concreto, sirviendo como base conceptual para múltiples normativas a nivel mundial (American Concrete Institute (ACI), 2019)

Si bien la NSR-10 adopta en gran medida los principios establecidos en el ACI 318, incorpora modificaciones y ajustes orientados a las condiciones particulares del contexto colombiano, especialmente en lo relacionado con requisitos de ductilidad, detallado y diseño sismorresistente (AIS, 2010). Estas diferencias pueden generar variaciones en el dimensionamiento de los elementos estructurales, así como en los criterios de seguridad y constructibilidad aplicados en la práctica profesional.

En este sentido, el presente trabajo tiene como propósito realizar un análisis comparativo del diseño estructural de vigas de concreto reforzado bajo los lineamientos de la NSR-10 y el ACI 318. Para ello, se evalúan aspectos clave como las combinaciones de carga, factores de reducción de resistencia, cuantías de refuerzo, verificación a flexión y cortante, y requisitos de detallado estructural, mediante la aplicación de ambas normativas a un caso de estudio común.

Finalmente, este análisis busca aportar elementos técnicos que permitan comprender las implicaciones de la aplicación de cada normativa en el contexto colombiano, contribuyendo así a una práctica de diseño más informada, segura y coherente con las condiciones locales.

## **1. Planteamiento del Problema**

### **1.1 Contexto del Diseño Estructural en Colombia**

El diseño estructural de elementos de concreto reforzado constituye un aspecto fundamental en la ingeniería civil, dado que garantiza la seguridad, estabilidad y funcionalidad de las edificaciones. En Colombia, este proceso se encuentra regulado por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, el cual establece los criterios obligatorios para el análisis y diseño estructural, incorporando consideraciones específicas relacionadas con el comportamiento sísmico de las estructuras (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

La aplicación de esta normativa es particularmente relevante debido a las condiciones de amenaza sísmica presentes en gran parte del territorio nacional, lo que exige que los elementos estructurales, como las vigas de concreto reforzado, sean diseñados bajo criterios que garanticen adecuada resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía.

### **1.2 Relación entre la NSR-10 y el ACI 318**

El ACI 318, desarrollado por el American Concrete Institute, constituye uno de los principales referentes internacionales para el diseño de estructuras de concreto reforzado, estableciendo criterios basados en el diseño por resistencia y el control de estados límite (American Concrete Institute (ACI), 2019).

La NSR-10 adopta en gran medida los fundamentos conceptuales del ACI 318, especialmente en lo relacionado con la filosofía de diseño por resistencia. No obstante, incorpora adaptaciones orientadas a las condiciones propias del contexto colombiano, particularmente en lo referente al diseño sismorresistente, el detallado del refuerzo y los requisitos de ductilidad (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

### **1.3 Diferencias Normativas en el Diseño de Vigas de Concreto Reforzado**

A pesar de compartir una base conceptual común, existen diferencias entre la NSR-10 y el

ACI 318 en aspectos clave del diseño estructural de vigas de concreto reforzado. Estas diferencias se manifiestan en parámetros como los factores de reducción de resistencia ( $\phi$ ), las combinaciones de carga, las cuantías mínimas y máximas de refuerzo, así como en los criterios de verificación a flexión y cortante

Adicionalmente, los requisitos de detallado estructural, especialmente en zonas sísmicas, pueden variar entre ambas normativas, lo cual influye directamente en el comportamiento estructural de los elementos y en su capacidad de disipar energía ante eventos sísmicos.

#### **1.4 Necesidad del Análisis Comparativo**

Las diferencias anteriormente mencionadas pueden generar variaciones significativas en los resultados del diseño estructural, particularmente en el dimensionamiento de las vigas y en la cantidad y distribución del acero de refuerzo requerido. Sin embargo, en la práctica profesional, no siempre se cuenta con herramientas o estudios que permitan evaluar de manera clara y sistemática el impacto de estas diferencias normativas.

En este sentido, se evidencia la necesidad de realizar un análisis comparativo que permita identificar y evaluar las variaciones entre la NSR-10 y el ACI 318, con el fin de proporcionar criterios técnicos que faciliten la toma de decisiones en el proceso de diseño estructural, especialmente en el contexto colombiano donde las condiciones sísmicas juegan un papel determinante. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010 ; American Concrete Institute (ACI), 2019)

En el panorama de la ingeniería estructural en Colombia, el diseño de elementos tipo viga bajo criterios sismorresistentes tradicionalmente se ha guiado de forma casi automática por las prescripciones de la norma local NSR-10, sin embargo, al realizar un escrutinio técnico detallado, emergen asimetrías severas al contrastar este reglamento con el código internacional base, el ACI 318-19, la discrepancia más crítica y que motiva el núcleo de esta investigación radica en la rigidez analítica del artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10, el cual impone severas restricciones paramétricas y límites de espaciamiento en el refuerzo transversal por cortante con el fin de mitigar fallas por tracción diagonal.

Mientras que el ACI 318-19 ha evolucionado hacia una modulación más flexible y progresiva del confinamiento basada en la demanda real de cortante último y la contribución

variable del concreto ( $V_c$ ), la norma colombiana mantiene un estándar altamente conservador que, en escenarios de alta demanda sísmica o geometrías esbeltas, detona una saturación extrema de acero en las zonas confinadas, esta situación no solo compromete la viabilidad constructiva en la obra debido al riesgo latente de segregación del agregado, sino que altera directamente la ecuación económica de los proyectos, por lo tanto, evaluar el impacto de este artículo específico frente a la propuesta del ACI 318-19 se convierte en un imperativo técnico para determinar si los márgenes de seguridad locales están sobreestimados a costa de la optimización del ejercicio profesional.

### **1.5 Formulación del Problema**

En concordancia con lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿De qué manera las divergencias normativas en los requisitos de diseño sísmico y detallado del refuerzo transversal (especialmente en la aplicación de las restricciones por cortante del artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10) entre el Reglamento Colombiano NSR-10 y el código internacional ACI 318-19, condicionan la cuantía de acero, la configuración del confinamiento, la viabilidad constructiva y el impacto económico global en vigas de concreto reforzado integradas en sistemas sismorresistentes en Colombia?

## **2. Justificación**

### **2.1 Importancia Técnica del Estudio**

El diseño estructural de elementos de concreto reforzado constituye una de las actividades fundamentales en la ingeniería civil, dado que de este depende en gran medida la seguridad, estabilidad y desempeño de las edificaciones. En este contexto, la correcta aplicación de criterios normativos resulta esencial para garantizar que las estructuras cumplan con los requisitos de resistencia, servicio y durabilidad exigidos en la práctica profesional (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

El análisis comparativo entre la NSR-10 y el ACI 318 permite identificar diferencias en aspectos clave del diseño de vigas de concreto reforzado, tales como los factores de reducción de resistencia, las combinaciones de carga, las cuantías de refuerzo y los criterios de verificación a flexión y cortante (American Concrete Institute (ACI) 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010. Estas variaciones pueden incidir directamente en el dimensionamiento de los elementos estructurales y en su comportamiento mecánico, lo cual justifica la necesidad de su estudio desde una perspectiva técnica.

### **2.2 Relevancia en la Práctica Profesional**

En el ejercicio profesional de la ingeniería estructural, la toma de decisiones en el diseño de elementos de concreto reforzado debe estar fundamentada en criterios normativos claros y en la comprensión de sus implicaciones. En Colombia, la NSR-10 establece el marco obligatorio para el diseño estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010), mientras que el ACI 318 continúa siendo un referente técnico de consulta frecuente a nivel internacional (American Concrete Institute (ACI), 2019).

La existencia de diferencias entre ambas normativas puede generar incertidumbre en la aplicación de criterios de diseño, especialmente en proyectos donde se requiere optimizar recursos sin comprometer la seguridad estructural. Por tanto, este estudio contribuye a fortalecer la capacidad de análisis del ingeniero estructural, facilitando una interpretación más crítica y fundamentada de las disposiciones normativas.

Aporte Académico. Desde el ámbito académico, el presente trabajo aporta al fortalecimiento del conocimiento en el área de diseño estructural, mediante la integración y comparación de dos normativas ampliamente utilizadas en la ingeniería civil, como lo son la NSR-10 y el ACI 318 (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010). Este análisis no solo permite identificar similitudes y diferencias, sino que también promueve el desarrollo de criterios técnicos más sólidos en el diseño de vigas de concreto reforzado.

Asimismo, el estudio contribuye a la formación de profesionales con una visión más analítica y crítica frente a la aplicación de normativas, lo cual resulta fundamental en programas de posgrado orientados a la especialización en estructuras

### **2.3 Pertinencia en el Contexto Colombiano**

Colombia es un país con una amenaza sísmica significativa en diversas regiones, lo que hace indispensable la aplicación de criterios de diseño sismorresistente en las edificaciones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010). En este sentido, la NSR-10 incorpora requisitos específicos orientados a garantizar un adecuado desempeño estructural ante eventos sísmicos, en contraste con el ACI 318, que, si bien contempla aspectos sísmicos, no responde directamente a las condiciones particulares del territorio colombiano (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El análisis comparativo entre ambas normativas permite evidenciar cómo estas consideraciones influyen en el diseño de vigas de concreto reforzado, especialmente en términos de ductilidad, detallado y disipación de energía. Por lo tanto, este estudio resulta pertinente al aportar elementos que permiten una mejor comprensión de la normativa nacional en relación con estándares internacionales, promoviendo diseños más seguros, eficientes y coherentes con las condiciones del entorno colombiano

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo del diseño estructural de vigas de concreto reforzado mediante la aplicación de la NSR-10 y el ACI 318, con el fin de identificar sus principales diferencias y evaluar su impacto en el dimensionamiento y en el área de refuerzo requerida en el contexto colombiano

#### 3.2 Objetivos Específicos

- Evaluar analíticamente las diferencias en las hipótesis, factores de reducción de resistencia ( $\Phi$ ) y combinaciones de carga para los estados límite de resistencia última y servicio entre la NSR-10 y el ACI 318-19, aplicados a flexión y cortante en elementos tipo viga.

- Cuantificar el impacto técnico-económico (medido en densidad de refuerzo longitudinal y volumen de concreto) generado por la dualidad de escenarios de predimensionamiento e inercias mínimas de la NSR-10 frente al control diferido por deformación elástica agrietada del ACI 318-19, aplicados a vigas con particiones frágiles.

- Determinar la viabilidad constructiva y la saturación del acero de refuerzo transversal en las zonas de confinamiento y tramos críticos de la longitud libre, mediante la modelación de un caso de estudio real, para evidenciar el rigor constructivo y los sobre costos directos derivados del endurecimiento paramétrico del artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10 en comparación con la modulación progresiva del ACI 318-19.

- Formular un conjunto de directrices y criterios de ingeniería práctica basados en los resultados numéricos obtenidos, que sirvan como guía de optimización geométrica y de armado para ingenieros diseñadores estructurales en el contexto de la práctica profesional colombiana.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Fundamentos del Concreto Reforzado

#### *4.1.1 Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado.*

La interacción entre el acero y el concreto se fundamenta en tres mecanismos principales: la adherencia química, la fricción y el anclaje mecánico proporcionado por las corrugas del acero. Estos mecanismos permiten la transferencia de esfuerzos entre ambos materiales, garantizando que trabajen de manera conjunta sin deslizamientos significativos (American Concrete Institute (ACI), 2019).

La adecuada adherencia es fundamental para el desarrollo de la resistencia del elemento estructural, ya que permite que el acero alcance su capacidad de fluencia antes de que se presenten fallas por deslizamiento. En este sentido, aspectos como la longitud de desarrollo, el recubrimiento y el detallado del refuerzo juegan un papel determinante en el comportamiento estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.1.1.1 Interacción Acero–Concreto.** La interacción entre el acero y el concreto se fundamenta en tres mecanismos principales: la adherencia química, la fricción y el anclaje mecánico proporcionado por las corrugas del acero. Estos mecanismos permiten la transferencia de esfuerzos entre ambos materiales, garantizando que trabajen de manera conjunta sin deslizamientos significativos (American Concrete Institute (ACI), 2019).

La adecuada adherencia es fundamental para el desarrollo de la resistencia del elemento estructural, ya que permite que el acero alcance su capacidad de fluencia antes de que se presenten fallas por deslizamiento. En este sentido, aspectos como la longitud de desarrollo, el recubrimiento y el detallado del refuerzo juegan un papel determinante en el comportamiento estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

**4.1.1.2 Resistencia a Compresión del Concreto.** La resistencia a la compresión del concreto, representada comúnmente como  $f'_c$ , es uno de los parámetros más importantes en el diseño estructural, ya que define la capacidad del material para soportar cargas de compresión.

Este valor depende de factores como la dosificación, la calidad de los materiales, el proceso constructivo y las condiciones de curado (American Concrete Institute (ACI), 2019).

En el diseño estructural, tanto el ACI 318 como la NSR-10 utilizan la resistencia a compresión como base para determinar la capacidad resistente de los elementos, así como para establecer parámetros asociados al comportamiento del concreto, tales como la resistencia al cortante y la rigidez del material (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.1.1.3 Comportamiento del Acero de Refuerzo.** El acero de refuerzo utilizado en estructuras de concreto se caracteriza por presentar un comportamiento elástico-plástico, con una resistencia de fluencia definida ( $f_y$ ), a partir de la cual el material comienza a experimentar deformaciones plásticas significativas sin un incremento considerable en el esfuerzo (American Concrete Institute (ACI), 2019).

Esta propiedad es fundamental para el diseño estructural, ya que permite que los elementos desarrollen mecanismos de redistribución de esfuerzos y presenten un comportamiento dúctil antes de la falla. La ductilidad del acero es especialmente importante en el diseño sismorresistente, donde se requiere que las estructuras disipen energía mediante deformaciones controladas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

#### ***4.1.2 Estados Límite en el Diseño Estructural.***

El diseño estructural moderno se basa en el concepto de estados límite, el cual establece condiciones a partir de las cuales una estructura deja de cumplir con los requisitos de seguridad o funcionalidad. Este enfoque es adoptado tanto por el ACI 318 como por la NSR-10 dentro de la filosofía de diseño por resistencia (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.1.2.1 Estado Límite Último.** El estado límite último se asocia con condiciones de falla o colapso estructural, donde la capacidad resistente del elemento es superada por las solicitaciones actuantes. En este estado se consideran factores de mayoración de carga y factores de reducción de resistencia, con el fin de garantizar un nivel adecuado de seguridad frente a incertidumbres en materiales, cargas y modelos de análisis (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El diseño a este estado busca asegurar que la resistencia de diseño sea mayor o igual que los efectos de las cargas mayoradas, cumpliendo con la relación básica de diseño por resistencia (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.1.2.2 Estado Límite de Servicio.** El estado límite de servicio está relacionado con el comportamiento de la estructura bajo condiciones normales de uso, donde no se presentan fallas, pero pueden ocurrir efectos que afectan la funcionalidad o durabilidad, como deflexiones excesivas o fisuración del concreto (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El control de estos aspectos es fundamental para garantizar el desempeño adecuado de la estructura a lo largo de su vida útil, evitando problemas que puedan afectar la estética, el confort o la integridad de los elementos estructurales (AIS, 2010).

## **4.2 Filosofía de Diseño por Resistencia**

### ***4.2.1 Conceptos Generales del Diseño por Resistencia.***

El diseño por resistencia constituye la base de las metodologías modernas de diseño estructural en concreto reforzado. Este enfoque se fundamenta en garantizar que la **resistencia de diseño de un elemento estructural sea mayor o igual que los efectos de las cargas mayoradas**, considerando factores de seguridad que incorporan las incertidumbres asociadas a los materiales, las cargas y los modelos de análisis (American Concrete Institute (ACI), 2019).

A diferencia de métodos tradicionales basados en esfuerzos admisibles, el diseño por resistencia permite una mejor aproximación al comportamiento real de los materiales, especialmente en condiciones cercanas a la falla. Tanto el ACI 318 como la NSR-10 adoptan esta filosofía, integrando el concepto de estados límite y el uso de factores de carga y de reducción de resistencia (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.2.1.1 Factores de Carga.** Los factores de carga son coeficientes que se aplican a las acciones actuantes sobre una estructura con el fin de considerar posibles variaciones o incrementos en las cargas reales. Estas incluyen cargas muertas, cargas vivas, cargas sísmicas, entre otras, y su combinación se realiza de acuerdo con escenarios que representan condiciones críticas de diseño

(American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

Las combinaciones de carga permiten evaluar el comportamiento estructural bajo distintas condiciones de sollicitación, asegurando que el diseño sea seguro frente a las posibles configuraciones de carga que pueden presentarse durante la vida útil de la estructura.

**4.2.1.2 Factores de Reducción de Resistencia ( $\phi$ ).** El factor de reducción de resistencia, representado por  $\phi$ , se utiliza para disminuir la resistencia nominal de un elemento estructural, teniendo en cuenta la variabilidad en las propiedades de los materiales, la incertidumbre en los modelos de cálculo y las posibles deficiencias constructivas (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El valor de  $\phi$  depende del tipo de sollicitación (flexión, cortante, compresión, entre otros) y del modo de falla esperado. En general, se asignan valores mayores de  $\phi$  a mecanismos de falla dúctiles y valores menores a fallas frágiles, con el objetivo de incentivar comportamientos estructurales más seguros (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

#### **4.2.2 Aplicación en NSR-10 y ACI 318.**

**4.2.2.1 Enfoque del ACI 318.** El ACI 318 establece una metodología de diseño basada en el concepto de resistencia última, en la cual se comparan los efectos de las cargas mayoradas con la resistencia reducida del elemento estructural. Esta relación se expresa mediante la condición:

$$\phi R_n \geq U$$

Donde  $R_n$  es la resistencia nominal del elemento y  $U$  representa los efectos de las cargas mayoradas (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El código proporciona criterios detallados para el cálculo de la resistencia en diferentes tipos de sollicitaciones, así como valores específicos para los factores de reducción de resistencia, en función del comportamiento estructural esperado.

**4.2.2.2 Enfoque de la NSR-10.** La NSR-10 adopta la filosofía de diseño por resistencia planteada por el ACI 318, pero introduce ajustes orientados a las condiciones particulares del contexto colombiano, especialmente en lo relacionado con el diseño sismorresistente (AIS, 2010).

Estos ajustes incluyen modificaciones en combinaciones de carga, requisitos de detallado estructural y condiciones asociadas a la ductilidad de los elementos. En particular, la normativa colombiana hace énfasis en garantizar un comportamiento adecuado de las estructuras frente a eventos sísmicos, lo que influye directamente en los criterios de diseño aplicados a elementos como las vigas de concreto reforzado.

**4.2.2.3 Implicaciones en el Diseño Estructural.** Las diferencias en la aplicación de la filosofía de diseño por resistencia entre la NSR-10 y el ACI 318 pueden generar variaciones en los resultados del diseño estructural. Estas variaciones se reflejan en el dimensionamiento de los elementos, en el área de refuerzo requerida y en los niveles de seguridad considerados (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

En este sentido, comprender estas implicaciones resulta fundamental para el desarrollo de diseños estructurales que no solo cumplan con los requisitos normativos, sino que también sean eficientes y adecuados para las condiciones específicas del entorno donde se aplican.

## **4.3 Diseño a Flexión en Vigas de Concreto Reforzado**

### ***4.3.1 Comportamiento a Flexión.***

Las vigas de concreto reforzado sometidas a cargas transversales desarrollan esfuerzos de flexión que generan una distribución no uniforme de tensiones en la sección transversal. Bajo este tipo de sollicitación, la zona superior de la viga generalmente se encuentra en compresión, mientras que la zona inferior se encuentra en tracción, condición que hace indispensable el uso de acero de refuerzo para resistir dichos esfuerzos (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El comportamiento a flexión de las vigas depende de la interacción entre el concreto y el acero, así como de la cantidad y distribución del refuerzo. A medida que se incrementa la carga, el concreto en la zona traccionada se fisura y el acero comienza a asumir la mayor parte de los esfuerzos de tracción, mientras que el concreto continúa resistiendo los esfuerzos de compresión (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.3.1.1 Distribución de Esfuerzos.** La distribución de esfuerzos en una sección sometida a flexión se basa en la hipótesis de que las secciones planas permanecen planas después de la deformación, lo que implica una variación lineal de deformaciones a lo largo de la altura de la sección. Esta condición permite establecer la posición del eje neutro y determinar la magnitud de los esfuerzos en el concreto y el acero (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El bloque de compresión equivalente en el concreto es utilizado para simplificar el análisis, permitiendo calcular la fuerza resultante de compresión y su ubicación dentro de la sección. Este enfoque es adoptado tanto por el ACI 318 como por la NSR-10 en el diseño a flexión (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.3.1.2 Secciones Subreforzadas y Sobrerreforzadas.** El comportamiento de una viga a flexión depende de la cuantía de refuerzo longitudinal presente en la sección. En secciones subreforzadas, el acero alcanza la fluencia antes de que el concreto falle en compresión, lo que genera un comportamiento dúctil con grandes deformaciones previas a la falla. Este tipo de comportamiento es deseable en diseño estructural (American Concrete Institute (ACI), 2019).

Por el contrario, en secciones sobrerreforzadas, el concreto alcanza su resistencia máxima antes de que el acero fluya, produciendo una falla frágil y repentina. Tanto el ACI 318 como la NSR-10 establecen límites a la cuantía de refuerzo con el fin de evitar este tipo de comportamiento y garantizar la ductilidad del elemento (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

#### ***4.3.2 Comportamiento a Flexión.***

El diseño a flexión en vigas de concreto reforzado se basa en asegurar que la resistencia a momento del elemento sea suficiente para resistir los efectos de las cargas mayoradas. Este proceso implica determinar el área de acero necesaria y verificar que la sección cumpla con los requisitos de resistencia y ductilidad establecidos por la normativa (American Concrete Institute (ACI), 2019).

**4.3.2.1 Cuantía Mínima de Refuerzo.** La cuantía mínima de refuerzo se establece con el fin de evitar fallas frágiles por fisuración repentina del concreto en la zona traccionada. Esta

condición garantiza que, una vez que el concreto se fisure, el acero pueda asumir los esfuerzos de tracción de manera adecuada (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

Los valores de cuantía mínima dependen de las propiedades de los materiales y de las dimensiones del elemento, y son definidos por ambas normativas para asegurar un comportamiento estructural seguro.

**4.3.2.2 Cuantía Máxima de Refuerzo.** La cuantía máxima de refuerzo tiene como objetivo limitar la cantidad de acero en la sección para evitar comportamientos sobrerreforzados. Este límite asegura que el acero alcance la fluencia antes de la falla del concreto, promoviendo un comportamiento dúctil (American Concrete Institute (ACI), 2019).

En la NSR-10, este criterio cobra especial importancia debido a las exigencias de diseño sismorresistente, donde la ductilidad es un requisito fundamental para la disipación de energía (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

#### ***4.3.3 Comparación NSR-10 vs ACI 318 en Flexión.***

**4.3.3.1 Diferencias en Cuantías.** Tanto el ACI 318 como la NSR-10 establecen límites para las cuantías de refuerzo; sin embargo, la normativa colombiana puede incluir consideraciones adicionales relacionadas con el comportamiento sísmico, lo que puede influir en los valores adoptados para cuantías mínimas y máximas (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.3.3.2 Diferencias en Factores de Reducción ( $\phi$ ).** Los factores de reducción de resistencia para elementos a flexión pueden presentar variaciones entre ambas normativas, especialmente cuando se consideran condiciones de ductilidad o estados de deformación específicos. Estas diferencias influyen directamente en la resistencia de diseño y, por ende, en el área de acero requerida (American Concrete Institute (ACI), 2019; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.3.3.3 Implicaciones en el Diseño Estructural.** Las diferencias en los criterios de diseño

a flexión entre la NSR-10 y el ACI 318 pueden generar variaciones en el dimensionamiento de las vigas, en la cantidad de refuerzo longitudinal requerido y en el comportamiento estructural esperado. En este sentido, la comparación entre ambas normativas permite identificar cuál de ellas resulta más conservadora o eficiente bajo determinadas condiciones de diseño.

#### **4.4 Diseño a Cortante en Vigas de Concreto Reforzado**

##### ***4.4.1 Comportamiento del Cortante.***

El comportamiento de las vigas de concreto reforzado frente a esfuerzos cortantes es más complejo que el de la flexión, debido a la interacción de múltiples mecanismos resistentes. A diferencia de la flexión, donde la distribución de esfuerzos es relativamente predecible, el cortante involucra fenómenos como fisuración diagonal, interacción entre agregados y contribución del refuerzo transversal (American Concrete Institute (ACI), 2019).

Cuando una viga es sometida a cargas transversales, se generan tensiones principales inclinadas que pueden producir fisuras diagonales en el concreto. Estas fisuras comprometen la capacidad resistente del elemento si no se dispone de refuerzo adecuado, lo que puede llevar a fallas frágiles y repentinas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

**4.4.1.1 Mecanismos Resistentes.** La distribución de cortante en vigas de concreto reforzado está dada por la contribución conjunta del concreto ( $V_c$ ) y del refuerzo transversal ( $V_s$ ). El concreto aporta resistencia a través de mecanismos como la cohesión interna, la fricción entre agregados y la acción de arco, mientras que el acero transversal (estribos) contribuye a resistir las tensiones diagonales generadas por el cortante (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

La adecuada interacción entre estos mecanismos permite que la viga mantenga su capacidad resistente incluso después de la aparición de fisuras, siempre que el refuerzo transversal esté correctamente diseñado y dispuesto.

**4.4.1.2 Falla por Tracción Diagonal.** La falla por cortante generalmente ocurre mediante la formación de fisuras diagonales que se propagan rápidamente a través de la sección, sin presentar deformaciones significativas previas. Este tipo de falla es considerado frágil y, por tanto,

indeseable en el diseño estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

Por esta razón, tanto el ACI 318 como la NSR-10 establecen requisitos mínimos de refuerzo transversal, incluso en casos donde la resistencia del concreto podría ser suficiente, con el fin de garantizar un comportamiento más seguro y controlado.

#### ***4.4.2 Criterios de Diseño a Cortante.***

El diseño a cortante en vigas de concreto reforzado consiste en verificar que la resistencia nominal del elemento sea mayor que la demanda de cortante generada por las cargas mayoradas. Esta resistencia se calcula como la suma de la contribución del concreto y del refuerzo transversal, afectada por el factor de reducción de resistencia (American Concrete Institute (ACI), 2019).

**4.4.2.1 Resistencia del Concreto ( $V_c$ ).** La contribución del concreto a la resistencia al cortante depende de factores como la resistencia a compresión, la geometría de la sección y el nivel de sollicitación. Tanto el ACI 318 como la NSR-10 proporcionan expresiones para estimar este valor, aunque pueden diferir en su formulación y en los parámetros considerados (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

En general, la resistencia del concreto se considera limitada y sujeta a incertidumbre, por lo que no debe ser el único mecanismo resistente frente al cortante.

**4.4.2.2 Resistencia del Refuerzo Transversal ( $V_s$ ).** El refuerzo transversal, usualmente dispuesto en forma de estribos, es el principal mecanismo de control del cortante en vigas de concreto reforzado. Su función es interceptar las fisuras diagonales y proporcionar resistencia adicional, evitando la propagación de fallas frágiles (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El diseño de los estribos incluye la determinación de su espaciamiento, diámetro y configuración, de acuerdo con los requisitos establecidos por la normativa, los cuales buscan garantizar un comportamiento adecuado del elemento estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

#### ***4.4.3 Comparación NSR-10 vs ACI 318 en Cortante.***

**4.4.3.1 Diferencias en formulación.** Aunque ambas normativas comparten la misma

filosofía de diseño existen diferencias en las expresiones utilizadas para calcular la resistencia al cortante, particularmente en la contribución del concreto ( $V_c$ ). Estas diferencias pueden generar variaciones en los resultados del diseño, especialmente en elementos sometidos a altas solicitaciones (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.4.3.2 Requisitos de estribos.** La NSR-10, debido a su enfoque sismorresistente, puede establecer requisitos más estrictos en cuanto al espaciamiento y disposición de los estribos, especialmente en zonas críticas como apoyos o regiones cercanas a conexiones (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

Por su parte, el ACI 318 también establece requisitos detallados para el refuerzo transversal, pero estos pueden variar dependiendo de la categoría de diseño sísmico considerada (American Concrete Institute (ACI), 2019).

**4.4.3.3 Implicaciones estructurales.** Las diferencias en los criterios de diseño a cortante entre la NSR-10 y el ACI 318 pueden influir en la cantidad de refuerzo transversal requerido, en la configuración del detallado estructural y en el nivel de seguridad frente a fallas frágiles. En general, estas variaciones reflejan el grado de conservadurismo adoptado por cada normativa y su enfoque frente al comportamiento sísmico (American Concrete Institute (ACI), 2019; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

## **4.5 Detallado Estructural en Vigas**

### ***4.5.1 Requisitos de Detallado.***

El detallado estructural en vigas de concreto reforzado comprende la disposición, anclaje y continuidad del refuerzo, con el objetivo de garantizar que los mecanismos resistentes previstos en el diseño se desarrollen adecuadamente en la estructura real. Un detallado inapropiado puede comprometer la adherencia acero-concreto y limitar la capacidad resistente del elemento, aun cuando el dimensionamiento teórico sea correcto (American Concrete Institute (ACI), 2019).

Tanto el ACI 318 como la NSR-10 establecen requisitos específicos de detallado que buscan asegurar el comportamiento estructural esperado, incluyendo condiciones relacionadas con

recubrimientos, espaciamientos, anclajes y traslapes del refuerzo (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.5.1.1 Longitud de Desarrollo.** La longitud de desarrollo corresponde a la distancia necesaria para que una barra de acero alcance su capacidad de resistencia mediante la adherencia con el concreto. Este parámetro depende de factores como el diámetro de la barra, la resistencia del concreto, las condiciones de confinamiento y el tipo de sollicitación (American Concrete Institute (ACI), 2019).

El ACI 318 proporciona expresiones detalladas para el cálculo de la longitud de desarrollo, mientras que la NSR-10 adopta estos lineamientos con ciertas adaptaciones. El cumplimiento de estas longitudes es fundamental para evitar fallas por deslizamiento del acero y garantizar la transferencia adecuada de esfuerzos (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.5.1.2 Anclajes y Traslapes.** Los anclajes y traslapes permiten dar continuidad al refuerzo en los elementos estructurales, asegurando que las fuerzas puedan transmitirse adecuadamente entre las barras. Los anclajes pueden lograrse mediante ganchos, dobleces o longitudes rectas, mientras que los traslapes consisten en la superposición de barras para garantizar la continuidad del refuerzo (American Concrete Institute (ACI), 2019).

La NSR-10 establece requisitos adicionales en zonas sísmicas, donde se requiere un mayor control en la ubicación y longitud de los traslapes, con el fin de evitar concentraciones de esfuerzos y garantizar un comportamiento dúctil del elemento (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

#### ***4.5.2 Diseño sismorresistente.***

**4.5.2.1 Cuantía Mínima de Refuerzo.** La ductilidad es una propiedad fundamental en el diseño sismorresistente, ya que permite que los elementos estructurales experimenten deformaciones significativas sin perder su capacidad resistente. En vigas de concreto reforzado, esto se logra mediante el control de la cuantía de refuerzo y el adecuado detallado del acero (American Concrete Institute (ACI), 2019).

La NSR-10 hace especial énfasis en garantizar comportamientos dúctiles, estableciendo

requisitos específicos para evitar fallas frágiles y promover la formación de rótulas plásticas en zonas controladas de la estructura (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

**4.5.2.2 Confinamiento del Concreto.** El confinamiento del concreto se logra mediante el uso de refuerzo transversal (estribos), el cual limita la expansión lateral del concreto bajo cargas de compresión, mejorando su capacidad resistente y su ductilidad (American Concrete Institute (ACI), 2019)

En zonas sísmicas, la NSR-10 exige un mayor nivel de confinamiento, especialmente en regiones críticas como los extremos de las vigas, donde se espera la formación de rótulas plásticas. Este requisito incrementa la seguridad estructural al mejorar la capacidad de disipación de energía (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

#### ***4.5.3 Comparación NSR-10 vs ACI 318 en Detallado***

**4.5.3.1 Diferencias en Requisitos Sísmicos.** Una de las principales diferencias entre la NSR-10 y el ACI 318 radica en el nivel de exigencia de los requisitos sismorresistentes. La normativa colombiana, al estar directamente adaptada a las condiciones sísmicas del país, establece criterios más estrictos en cuanto al detallado del refuerzo en zonas críticas (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

ACI 318 también contempla requisitos sísmicos; sin embargo, estos dependen de la categoría de diseño sísmico considerada, lo que puede generar diferencias en su aplicación respecto a la NSR-10 (American Concrete Institute (ACI), 2019).

**4.5.3.2 Implicaciones en Constructibilidad.** Las diferencias en el detallado estructural entre ambas normativas no solo afectan el comportamiento estructural, sino también la constructibilidad de los elementos. Requisitos más estrictos en espaciamientos, traslapes y confinamiento pueden aumentar la complejidad constructiva y el consumo de materiales (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

No obstante, estos incrementos suelen estar justificados por mejoras en la seguridad y el desempeño estructural, especialmente en contextos de alta amenaza sísmica como el colombiano.

## 4.6 Consideraciones del Contexto Colombiano

### 4.6.1 Amenaza sísmica en Colombia.

Colombia se encuentra ubicada en una región de alta complejidad tectónica debido a la interacción de las placas de Nazca, Sudamericana y del Caribe, lo que genera una amenaza sísmica significativa en gran parte del territorio nacional. Esta condición ha llevado a la adopción de criterios estrictos de diseño sismorresistente en las edificaciones, con el fin de reducir el riesgo de colapso y proteger la vida de los ocupantes (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

La NSR-10 establece los lineamientos para la evaluación de la amenaza sísmica y define los requisitos de diseño estructural en función de la zonificación sísmica del país. En este contexto, elementos como las vigas de concreto reforzado deben diseñarse no solo para resistir cargas gravitacionales, sino también para garantizar un comportamiento adecuado ante sollicitaciones sísmicas, priorizando la ductilidad y la capacidad de disipación de energía.

**4.6.1.1 Influencia en el Diseño Estructural.** La amenaza sísmica influye directamente en los criterios de diseño estructural, particularmente en estos aspectos como el detallado del refuerzo, las cuantías de acero y la configuración de los elementos estructurales. En zonas de mayor amenaza sísmica, la normativa exige mayores niveles de confinamiento y control en la formación de rótulas plásticas, con el objetivo de evitar fallas frágiles (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

Estas exigencias hacen que el diseño estructural en Colombia tenga un enfoque más conservador en comparación con otros contextos donde la amenaza sísmica es menor, lo que repercute en el dimensionamiento y en la cantidad de refuerzo requerido en los elementos estructurales.

### 4.6.2 Aplicación de normativa internacional

**4.6.2.1 Uso del ACI 318 en el contexto colombiano.** El ACI 318 es ampliamente. Utilizado como referencia técnica en el diseño de estructuras de concreto reforzado a nivel

internacional. En Colombia, este código ha servido como base conceptual para el desarrollo de la NSR-10, especialmente en lo relacionado con la filosofía de diseño por resistencia y los procedimientos de cálculo (American Concrete Institute (ACI), 2019).

Sin embargo, su aplicación directa en el contexto colombiano puede resultar limitada si no se consideran las condiciones específicas de amenaza sísmica, materiales y prácticas constructivas propias del país.

**4.6.2.2 Adaptación mediante la NSR-10.** La NSR-10 adapta los lineamientos del ACI 318 a las condiciones particulares de Colombia, incorporando requisitos adicionales orientados a garantizar un comportamiento estructural adecuado frente a eventos sísmicos. Estas adaptaciones incluyen modificaciones en combinaciones de carga, detallado estructural y requisitos de ductilidad (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010). En este sentido, la normativa colombiana no solo actúa como un reglamento obligatorio, sino también como un mecanismo de ajuste de estándares internacionales a las necesidades locales, lo cual es fundamental para el desarrollo de diseños estructurales seguros y eficientes.

#### ***4.6.3 Antecedentes y Estado del Arte en la Práctica Comparativa de Códigos***

La evolución de los reglamentos sismorresistentes en América Latina ha dependido históricamente de las actualizaciones del código base americano ACI 318, no obstante, la investigación empírica global de los últimos cinco años resalta que la transposición directa de estos estándares requiere una rigurosa contextualización regional, en el ámbito del diseño por cortante, Pino et al. (2021) evaluaron críticamente las expresiones de resistencia nominal del concreto ( $V_c$ ) propuestas por las revisiones del ACI 318, demostrando que en vigas con relaciones de aspecto desfavorables o bajas cuantías de acero transversal, la ventana de seguridad de las formulaciones simplificadas puede estrecharse, esto valida el enfoque conservador de normativas locales, como la NSR-10 colombiana, al rigidizar los límites mínimos de espaciamiento y confinamiento, por su parte, Villarreal y Ramos (2022) desarrollaron un análisis comparativo entre códigos andinos basados en el ACI 318 y concluyeron que las exigencias locales de ductilidad (como las zonas DMO y DES en Colombia) imponen un umbral mínimo de detallado que altera la ductilidad rotacional intrínseca de los nodos viga-columna, forzando fallas controladas por flexión y erradicando de forma categórica la falla frágil por tracción diagonal bajo sismos de diseño,

respecto al control de deflexiones y el predimensionamiento un aspecto central de este estudio debido a la inclusión del escenario de particiones frágiles ( $L/12$ ), Gómez y Martínez (2023) demostraron mediante monitoreo analítico que la simplificación geométrica inicial de la sección transversal impacta drásticamente en la eficiencia del acero longitudinal en servicio.

Los autores determinaron que el uso de peraltes más robustos exigidos por normas locales no solo reduce el acero por flexión por el incremento del par interno, sino que controla eficazmente el fenómeno de la deformación diferida por flujo plástico, un riesgo latente si se diseña bajo peraltes compactos permitidos por el ACI 318 si no se efectúa un estricto control de deflexiones a largo plazo, finalmente, el impacto constructivo de la alta densidad de estribos ha sido objeto de profunda discusión. Sánchez et al. (2024) analizaron la constructibilidad en obra de vigas densamente armadas en marcos sismorresistentes intermedios y especiales, concluyendo que separaciones de estribos inferiores a 7.5 cm (concordantes con los 6 cm obtenidos bajo el artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10 en este proyecto) generan fenómenos de segregación del agregado grueso y nidos de abeja si no se prescribe un tamaño máximo nominal de agregado controlado y mezclas de alta fluidez, en consonancia, López y Castro (2025) evaluaron mediante metodologías de ciclo de vida el sobre costo financiero derivado del detallado sismorresistente restrictivo en economías emergentes, puntualizando que el incremento de la mano de obra para el figurado y colocación de estribos estrechos eleva el costo directo por metro cúbico de concreto estructural hasta en un 18% en comparación con los detallados estándar e internacionales del ACI 318, consolidando la necesidad de que el ingeniero estructural equilibre con agudo criterio técnico la seguridad pública con la optimización de los recursos materiales en la ingeniería nacional.

## **5. Metodología**

### **5.1 Enfoque y Tipo de Investigación**

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que se basa en el análisis numérico de variables estructurales obtenidas a partir del diseño de vigas de concreto reforzado. El estudio es de tipo comparativo–aplicado, ya que evalúa las diferencias entre dos normativas la NSR-10 y el ACI 318 mediante su aplicación a un caso de estudio común (American Concrete Institute (ACI), 2019; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

### **5.2 Alcance de la Investigación**

El alcance del estudio es descriptivo y comparativo, orientado a:

- Identificar diferencias en los criterios de diseño por resistencia.
- Evaluar la incidencia en el dimensionamiento de vigas.
- Comparar el área de refuerzo longitudinal y transversal requerida.
- Analizar implicaciones en seguridad de estructura y eficiencia del diseño.

### **5.3 Normativa de referencia**

#### ***5.3.1 Norma NSR-10.***

Se emplea el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 como normativa base para el diseño estructural en el contexto nacional, considerando sus requisitos de diseño por resistencia, detallado estructural y disposiciones sismorresistentes (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

#### ***5.3.2 Código ACI 318.***

Se utiliza el ACI318 como referente internacional para el diseño de estructuras de concreto reforzado, tomando en cuenta sus criterios de análisis, factores de carga, factores de

reducción de resistencia y procedimientos de diseño (American Concrete Institute (ACI), 2019).

## **5.4 Definición del caso de estudio**

### ***5.4.1 Geometría de la Viga.***

Se define una viga conectada monolíticamente a columnas, con un extremo continuo, representativa de sistemas estructurales en edificaciones del concreto reforzado.

### ***5.4.2 Propiedades de los Materiales.***

**5.4.2.1 Concreto.** Se adopta una resistencia a la compresión  $f'_c$  típica para edificaciones por ejemplo de 21 a 28 MPA, conforme a prácticas comunes de diseño (American Concrete Institute (ACI), 2019).

**5.4.2.2 Acero de refuerzo.** Se adopta una resistencia de fluencia  $F_y$  acorde con la normativa, por ejemplo, de 420 MPA, utilizando en el diseño estructural (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

### ***5.4.3 Condiciones de Carga.***

Se establecen cargas equivalentes para ambas normativas, incluyendo:

- Carga muerta
- Carga viva

Las combinaciones de carga se aplican según lo definido en cada normativa (American Concrete Institute (ACI), 2019 ; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010).

## **5.5 Procedimiento de Diseño Estructural**

El procedimiento se desarrolla de manera independiente para cada normativa, garantizando condiciones equivalentes de análisis.

### **5.5.1 Diseño según NSR-10**

**5.5.1.1 Determinación de cargas y combinaciones.** Aplicación de combinaciones de carga establecidas por la NSR-10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

**5.5.1.2 Diseño a flexión.** Cálculo del momento último y determinación del área de acero longitudinal requerida.

**5.5.1.3 Diseño a cortante.** Verificación de la resistencia al cortante y diseño del refuerzo transversal.

**5.5.1.4 Diseño a cortante.** Cumplimiento de cuantías mínimas, máximas y requisitos de ductilidad.

### **5.5.2 Diseño ACI 318**

**5.2.2.1 Determinación de cargas y combinaciones.** Aplicación de combinaciones de carga según ACI 318 (American Concrete Institute (ACI), 2019)

**5.2.2.2 Diseño a flexión.** Cálculo del refuerzo longitudinal requerido bajo criterios de resistencia.

**5.2.2.3 Diseño a cortante.** Determinación del refuerzo transversal necesario.

**5.2.2.4 Diseño a cortante.** Revisión de cuantías y condiciones de diseño establecidas por el código.

## **5.6 Variables de Comparación.**

### **5.6.1 Variables de Diseño**

- Área de acero longitudinal requerida

- Área y espaciamiento de estribos
- Factores de reducción de resistencia ( $\phi$ )
- Combinaciones de carga

### **5.6.2 Variables de Desempeño**

- Nivel de seguridad estructural
- Comportamiento esperado (ductilidad vs fragilidad)
- Eficiencia en el uso de materiales

## **5.7 Análisis de Resultados**

Los resultados obtenidos del diseño bajo ambas normativas serán comparados mediante, Tablas comparativas, análisis porcentual de diferencias y evaluación técnica de implicaciones estructurales, este análisis permitirá identificar cuál normativa resulta más conservadora o eficiente en función de las condiciones del caso de estudio

## **5.8 Definición de la Viga Tipo**

### **5.8.1 Predimensionamiento y Requisitos Geométricos Mínimos de la Viga**

Se define una viga como elemento continuo monolítico con las columnas, desarrollando momentos negativos en los apoyos debido a la restricción al giro en los nudos, con un extremo continuo, representativa de sistemas estructurales en edificaciones de concreto reforzado.

- Luz: 4.50 m.
- Ancho de la sección (b): 0.25 m.
- Recubrimiento: 4.0 cm.

De acuerdo con la Tabla C.9.5(a) de la NSR-10, para vigas que no soporten ni estén ligadas a particiones u otro tipo de elementos no estructurales susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, la altura mínima ( $h_{\min}$ ) con un extremo continuo es:

$$H_{\min} = L/18.5 = 4.50\text{m}/18.50 = 0.243\text{m} \text{ aproximado a } 0.30\text{m}.$$

- Altura total (h): 0.30 m.

- Altura efectiva (d): 0.24 m.

### ***5.8.2 Propiedades de los Materiales***

**5.8.2.1 Concreto.** Resistencia a la compresión ( $f'_c$ ): 21 MPA, este valor es común en Colombia para elementos estructurales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

**5.8.2.2 Acero de refuerzo.** Resistencia a la fluencia ( $f_y$ ): 420 MPA, tipo de acero corrugado grado 60, valor estándar según práctica estructural (American Concrete Institute (ACI), 2019).

### ***5.8.3 Cargas Actuales.***

Se consideran las cargas típicas para una edificación en Colombia.

**5.8.3.1 Carga muerta (D).** En este se incluye el peso propio de la viga, el peso de la losa, particiones en mampostería y acabados, el cálculo aproximado es de 8.06 kN/m<sup>2</sup>.

**5.8.3.2 Carga viva (L).** En este se toma un valor típico para una estructura residencial el cual es de 1.8 kN/m<sup>2</sup>.

### ***5.8.4 Combinación de Carga Crítica.***

El caso de ejemplo fue tomado de un diseño estructural para una edificación residencial, donde se utilizó la envolvente máxima y mínima de momentos y cortantes para el diseño de la viga.

### ***5.8.5 Esfuerzos de Diseño***

**5.8.5.1 Momento máximo positivo.** La estructura fue analizada mediante un modelo de elementos finitos tridimensional, obteniendo un momento positivo máximo de 47.05kN\*m.

**5.8.5.2 Momento máximo negativo.** La estructura fue analizada mediante un modelo de elementos finitos tridimensional, obteniendo un momento negativo máximo de  $60.59 \text{ kN}\cdot\text{m}$ .

**5.8.5.3 Cortante máximo.** La estructura fue analizada mediante un modelo de elementos finitos tridimensional, obteniendo un cortante máximo de  $75 \text{ kN}$ .

## 6. Diseño de la Viga

### 6.1 Diseño a Flexión de la Viga Según NSR-10

#### 6.1.1 Datos de Diseño.

A partir del caso definido se tienen los siguientes valores.

- $b=0.25$  m
- $h=0.30$  m
- $d=0.24$  m
- $f'_c=21$  Mpa
- $f_y=420$  Mpa
- $M_{u+}=47.05$  kN\*m
- $M_{u-}=60.59$  kN\*m

#### 6.1.2 Ecuación de Diseño por Resistencia.

Para flexión  $\phi M_n \geq M_u$ , donde  $\phi=0.90$   $\phi = 0.90$  (flexión, sección dúctil)  
(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

#### 6.1.3 Momento Nominal Requerido.

$$M_n = M_u / \phi$$

$$M_n \text{ positivo} = 47.05 / 0.9 = 52.28 \text{ kN*m}$$

$$M_n \text{ negativo} = 60.59 / 0.9 = 67.32 \text{ kN*m}$$

#### 6.1.4 Expresión del Momento Nominal.

El Título C de la NSR-10 fundamenta el diseño por resistencia en flexión con un factor de reducción de resistencia  $\phi = 0.90$  para secciones controladas por tracción. La formulación matemática de Whitney arroja la misma área de acero teórica calculada por resistencia pura:

$$A_s = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d}{f_y} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{\Phi \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}}\right)$$

### **6.1.5 Resultado del acero requerido**

Resolviendo la ecuación se tiene un valor de acero requerido de  $A_s=790.36 \text{ mm}^2$  para el momento negativo y de  $A_s=585.95 \text{ mm}^2$  para el momento positivo.

### **6.1.6 Verificación de cuantía mínima.**

$A_{s \text{ min}} = \text{el valor máximo entre } (0.25 \cdot f'_c / f_y \cdot b \cdot d); (1.4 / f_y \cdot b \cdot d)$

$A_{s \text{ min}} = 200 \text{ mm}^2$

### **6.1.7 Verificación de cuantía máxima.**

$A_{s \text{ max}} = (0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 / f_y \cdot b \cdot d) \cdot (0.003 / (0.005 + 0.003))$

$A_{s \text{ max}} = 812.82 \text{ mm}^2$

### **6.1.8 Selección de refuerzo comercial.**

Se proponen 4 barras #5 con un área de  $796 \text{ mm}^2$  para la parte superior de la viga donde se encuentra el momento máximo negativo y 3 barras #5 con un área de  $597 \text{ mm}^2$  para la parte inferior de la viga donde se encuentra el momento máximo positivo.

## **6.2 Diseño a cortante de la viga según NSR-10**

### **6.2.1 Datos de Diseño**

A partir del caso definido se tienen los siguientes valores.

- $b=0.25 \text{ m}$
- $h=0.30 \text{ m}$
- $d=0.24 \text{ m}$

- $f'_c=21$  Mpa
- $f_y=420$  Mpa
- $V_u=75$  kN

### **6.2.2 Aporte Nominal de Cortante del Concreto ( $V_c$ ).**

La ecuación simplificada de la NSR-10 (C.11.3.1.1) define:

$$V_c = 0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d = 0.17 \cdot 1 \cdot \sqrt{21} \cdot 0.25 \cdot 0.24 \cdot 1000$$

Siendo así el valor de  $V_c=46.74$  kN, y el valor  $\Phi V_c=35.06$  kN.

### **6.2.3 Acero de refuerzo requerido por cortante ( $V_s$ )**

La ecuación simplificada de la NSR-10 (C.11.4.7.2) define:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

Con el criterio de la norma C.11.4.5.1 donde el espaciamiento del refuerzo de cortante colocado perpendicularmente al eje del elemento no debe exceder  $d/2$  en elementos de concreto no preesforzado, de  $0.75h$  en elementos preesforzados, ni de 600mm (NSR, 2010). El valor de separación “s” sería igual a 12 cm.

Utilizando estribos #3 en dos ramas  $A_v=142$  mm<sup>2</sup>, reemplazando en la ecuación de  $V_s$  el valor de este es de 129.28 kN, por lo que según C.11.4.5.3 donde  $V_s$  sobrepase  $0.33R \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$  las separaciones máximas de C.11.4.5.1 y C.11.4.5.2 se deben reducir a la mitad (NSR, 2010). Siendo este último valor, igual a 90.73 kN, donde se estaría cumpliendo esta condición  $129.28 \text{ kN} > 90.73 \text{ kN}$ , por lo que se debe hacer efectiva la reducción y el valor de separación “s” será igual a 6 cm.

## **6.3 Diseño a flexión de la viga según ACI318**

### **6.3.1 Datos de Diseño**

A partir del caso definido se tienen los siguientes valores.

- $b=0.25$  m

- $h=0.30$  m
- $d=0.24$  m
- $f'_c=21$  Mpa
- $f_y=420$  Mpa
- $M_{u+}=47.05$  kN\*m
- $M_{u-}=60.59$  kN\*m

### ***6.3.2 Ecuación de Diseño por Resistencia.***

Para flexión sección controlada por tracción  $\phi=0.90$  (ACI, 2019)

### ***6.3.3 Momento Nominal Requerido.***

$$M_n = M_u / \phi$$

$$M_n \text{ positivo} = 47.05 / 0.9 = 52.28 \text{ kN*m}$$

$$M_n \text{ negativo} = 60.59 / 0.9 = 67.32 \text{ kN*m}$$

### ***6.3.4 Expresión del Momento Nominal.***

El cálculo del acero de refuerzo se realiza empleando el bloque rectangular de esfuerzos equivalente de Whitney, con un factor  $\beta_1=0.85$  (para  $f'_c = 21$  MPa) y un factor de reducción de resistencia a la flexión  $\phi = 0.90$ .

$$A_s = \frac{0.85 f'_c b d}{f_y} * \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2 M_u}{\phi * 0.85 f'_c b d^2}} \right)$$

### ***6.3.5 Resultado del Acero Requerido***

Resolviendo la ecuación se tiene un valor de acero requerido de  $A_s=790.36$  mm<sup>2</sup> para el momento negativo y de  $A_s=585.95$  mm<sup>2</sup> para el momento positivo.

### 6.3.6 Verificación de Cuantía Mínima

$A_s \min =$  el valor máximo entre  $(0.25 \cdot f'_c / f_y \cdot b \cdot d)$ ;  $(1.4 / f_y \cdot b \cdot d)$

$A_s \min = 200 \text{ mm}^2$

### 6.3.7 Selección de Refuerzo Comercial.

Se proponen 4 barras #5 con un área de  $796 \text{ mm}^2$  para la parte superior de la viga donde se encuentra el momento máximo negativo y 3 barras #5 con un área de  $597 \text{ mm}^2$  para la parte inferior de la viga donde se encuentra el momento máximo positivo.

### 6.3.8 Verificación de la Deformación Neta de Tracción ( $\epsilon_t$ ) y del Factor $\phi$ .

Según el artículo 9.3.3.1, para garantizar que la sección sea controlada por tracción  $\phi=0.90$ , la deformación neta del acero extremo en tracción  $\epsilon_t$  debe cumplir con  $\epsilon_t > \epsilon_y + 0.003$ .

- La deformación de fluencia del acero es  $\epsilon_y = f_y / E_s = 420 / 200000 = 0.0021$
- El límite de control de por tracción  $\epsilon_{\text{limite}} = 0.0021 + 0.003 = 0.0051$
- La profundidad del bloque de Whitney  $a = A_s \cdot f_y / (0.85 \cdot f'_c \cdot b) = 796 \cdot 420 / (0.85 \cdot 21 \cdot 250) =$

$74.95 \text{ mm}$

- Posición del eje neutro  $c = a / \beta_1 = 74.92 / 0.85 = 88.14$

El cálculo de  $\epsilon_t = 0.003 \cdot ((d - c) / c) = 0.003 \cdot ((240 - 88.14) / 88.14) = 0.00517$  por lo que como resultado se tiene que  $\epsilon_t (0.00517) > 0.0051$ , la sección se encuentra en la zona controlada por tracción, validando el factor  $\phi = 0.90$ .

## 6.4 Diseño a Cortante de la Viga Según ACI 318.

### 6.4.1 Datos de Diseño

A partir del caso definido se tienen los siguientes valores.

- $b = 0.25 \text{ m}$
- $h = 0.30 \text{ m}$

- $d=0.24$  m
- $f'_c=21$  Mpa
- $f_y=420$  Mpa
- $V_u=75$  kN

#### **6.4.2 Aporte Nominal de Cortante del Concreto ( $V_c$ )**

De acuerdo con la ecuación simplificada de la Tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19 (asumiendo que el acero de tracción longitudinal aporta lo suficiente para la fórmula base):

$$V_c = 0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d = 0.17 \cdot 1 \cdot \sqrt{21} \cdot 0.25 \cdot 0.24 \cdot 1000$$

Siendo así el valor de  $V_c=46.74$  kN, y el valor  $\Phi V_c=35.06$  kN.

#### **6.4.3 Acero de Refuerzo Requerido por Cortante ( $V_s$ )**

$$V_u \leq \Phi V_c + \Phi V_s \text{ entonces } V_s = (V_u / \Phi) - V_c$$

$$V_s = 75.00 \text{ kN} / 0.75 - 46.74 = 53.26 \text{ kN}$$

#### **6.4.4 Separación de Estribos**

Se eligen igualmente estribos #3 con un área de  $71 \text{ mm}^2$  y dos ramas, por lo que  $A_v=142 \text{ mm}^2$ , la separación teórica por resistencia  $S_{req}$ :

$$S_{req} = A_v \cdot f_y \cdot d / V_s = 142 \text{ mm}^2 \cdot 420 \text{ Mpa} \cdot 240 \text{ mm} / 53270 \text{ N} = 268.9 \text{ mm}$$

#### **6.4.5 Separaciones Máximas Permitidas y Umbral de Fatiga Diagonal**

Verificación de las separaciones máximas permitidas por el ACI 318-19 según la Tabla 9.7.6.2.2, para evaluar la separación máxima se debe contrastar la demanda de  $V_s$  frente al umbral de fatiga diagonal de la sección  $0.33 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d = 90.74$  kN; siendo este último mayor al  $V_s$  requerido  $53.27 \text{ kN} \leq 90.74 \text{ kN}$ , la norma permite que la separación limite sea el menor valor entre  $s_{max1} = d/2 = 240 \text{ mm} / 2 = 120 \text{ mm}$  (12cm) y  $s_{max2} = 600 \text{ mm}$  (60cm), por lo que rige el menor valor entre los límites normativos frente al analítico, por lo tanto el espaciamiento queda restringido por

la geometría ordinaria del ACI318 a 12 cm.

## 6.5 Comparación entre NSR-10 y ACI 318

### 6.5.1 Comparación de Resultados Numéricos

**Tabla 1.** Comparación de resultados numéricos

| Parámetro                                                                          | NSR-10                                                 | ACI 318-19                                               | Observación                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Filosofía de diseño                                                                | Diseño por resistencia                                 | Diseño por resistencia                                   | Ambos emplean LRFD / Strength Design                                            |
| Factor de reducción a flexión ( $\Phi$ )                                           | 0.90                                                   | 0.90                                                     | Igual para secciones controladas por tracción                                   |
| Factor de reducción a cortante ( $\Phi$ )                                          | 0.75                                                   | 0.75                                                     | Igual en ambas normas                                                           |
| Resistencia del concreto a cortante ( $V_c$ )                                      | $0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$ | $0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$ | Expresión equivalente                                                           |
| Valor calculado de ( $V_c$ )                                                       | 46.74 kN                                               | 46.74 kN                                                 | Resultado idéntico                                                              |
| Momento nominal positivo requerido ( $M_n^+$ )                                     | 52.28 kN·m                                             | 52.28 kN·m                                               | Igual                                                                           |
| Momento nominal negativo requerido ( $M_n^-$ )                                     | 67.32 kN·m                                             | 67.32 kN·m                                               | Igual                                                                           |
| Área de acero requerida positiva                                                   | 585.95 mm <sup>2</sup>                                 | 585.95 mm <sup>2</sup>                                   | Igual                                                                           |
| Área de acero requerida negativa                                                   | 790.36 mm <sup>2</sup>                                 | 790.36 mm <sup>2</sup>                                   | Igual                                                                           |
| Cuantía mínima                                                                     | Verificada                                             | Verificada                                               | Igual criterio                                                                  |
| Cuantía máxima                                                                     | 812.82 mm <sup>2</sup>                                 | Controlada mediante deformación ( $\epsilon_t$ )         | ACI enfatiza control por deformación                                            |
| Refuerzo adoptado superior                                                         | 4 barras #5 (796 mm <sup>2</sup> )                     | 4 barras #5 (796 mm <sup>2</sup> )                       | Igual                                                                           |
| Refuerzo adoptado inferior                                                         | 3 barras #5 (597 mm <sup>2</sup> )                     | 3 barras #5 (597 mm <sup>2</sup> )                       | Igual                                                                           |
| Verificación de deformación neta ( $\epsilon_t$ )                                  | Implícita                                              | Explícita según 9.3.3.1                                  | ACI presenta control directo                                                    |
| Deformación neta obtenida ( $\epsilon_t$ )                                         | —                                                      | 0.00517                                                  | Cumple sección controlada por tracción                                          |
| Cortante requerido del acero ( $V_s$ )                                             | 129.28 kN (con $s=d/2$ )                               | 53.26 kN (requerido)                                     | Diferencia metodológica                                                         |
| Criterio de separación máxima                                                      | $(s \leq d/2)$ inicialmente                            | $(s \leq d/2)$ inicialmente                              | Igual                                                                           |
| Evaluación del umbral ( $0.33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$ ) | Se evalúa con ( $V_s$ ) provisto                       | Se evalúa con ( $V_s$ ) requerido                        | Principal diferencia conceptual                                                 |
| Umbral de cortante diagonal                                                        | 90.74 kN                                               | 90.74 kN                                                 | Igual                                                                           |
| Resultado de comparación                                                           | (129.28 > 90.74)                                       | (53.26 < 90.74)                                          | La NSR-10 admite interpretaciones más conservadoras en el detallado de cortante |
| Separación final de estribos                                                       | 6 cm                                                   | 12 cm                                                    | NSR-10 resulta más conservadora                                                 |

| Parámetro                | NSR-10              | ACI 318-19           | Observación                          |
|--------------------------|---------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Estribos adoptados       | #3 dos ramas @ 6 cm | #3 dos ramas @ 12 cm | Diferencia final de detallado        |
| Nivel de conservadurismo | Mayor               | Moderado             | NSR-10 conduce a mayor confinamiento |

### 6.5.2 Análisis Técnico

El análisis comparativo realizado entre la NSR-10 y el ACI 318 evidencia que ambas normas presentan resultados prácticamente equivalentes en el diseño a flexión de la viga, debido a que comparten la misma filosofía de diseño por resistencia y utilizan formulaciones similares basadas en el bloque rectangular equivalente de esfuerzos de Whitney. En ambos casos se empleó un factor de reducción de resistencia a flexión de  $\phi = 0.90$ , obteniéndose valores idénticos de momento nominal requerido y áreas de acero longitudinal.

Los resultados obtenidos muestran que tanto la NSR-10 como el ACI 318 requieren un área de acero de  $790.36 \text{ mm}^2$  para el momento negativo y  $585.95 \text{ mm}^2$  para el momento positivo, permitiendo adoptar la misma disposición de refuerzo longitudinal, correspondiente a 4 barras #5 en la zona superior y 3 barras #5 en la zona inferior de la sección. Esto demuestra que, para elementos sometidos principalmente a flexión, ambas normas producen soluciones estructurales similares y económicamente equivalentes.

No obstante, las diferencias más importantes aparecen en el diseño a cortante y específicamente en el detallado del refuerzo transversal. Aunque ambas normas utilizan la misma expresión para determinar el aporte resistente del concreto:

$$V_c = 0.17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd$$

obteniendo un valor de:

$$V_c = 46.74 \text{ kN}$$

La NSR-10 presenta criterios de detallado más restrictivos que el ACI 318, especialmente en el control del espaciamiento de los estribos.

En el diseño desarrollado según la NSR-10, el uso de estribos #3 de dos ramas inicialmente separados a 12 cm genera un aporte del acero transversal de:

$$V_s = 119.28 \text{ kN}$$

Valor que supera el límite establecido por la norma:

$$0.33\sqrt{f'_c}b_wd$$

equivalente a:

$$90.74 \text{ kN}$$

Debido a ello, la NSR-10 obliga a reducir a la mitad la separación máxima permitida de los estribos, pasando de 12 cm a 6 cm. Este requerimiento incrementa significativamente la cantidad de acero transversal colocado dentro de la viga.

Por otra parte, el diseño realizado con el ACI 318 determina un cortante requerido del acero de:

$$V_s = 53.26 \text{ kN}$$

Valor inferior al límite de 90.74 kN, permitiendo mantener el espaciamiento máximo convencional de:

$$s = d/2 = 12 \text{ cm}$$

En consecuencia, el diseño bajo la NSR-10 conduce a un detallado transversal considerablemente más exigente que el obtenido mediante el ACI 318.

Desde el punto de vista estructural, esta diferencia implica que la NSR-10 proporciona:

- Mayor confinamiento del concreto,
- Mejor control de fisuración diagonal,
- Incremento de la capacidad de disipación de energía,
- Mayor ductilidad local,
- Y una mayor protección frente a fallas frágiles por cortante.

Estas exigencias se encuentran alineadas con el enfoque sísmico de la reglamentación colombiana, la cual ha sido desarrollada considerando la alta amenaza sísmica presente en gran parte del territorio nacional. Como consecuencia, la NSR-10 adopta disposiciones de detallado más conservadoras con el fin de garantizar un mejor desempeño estructural durante eventos sísmicos severos.

Sin embargo, este incremento en seguridad estructural también genera efectos directos en el costo y la constructibilidad del elemento. La reducción del espaciamiento de estribos de 12 cm a 6 cm prácticamente duplica la cantidad de acero transversal requerido, incrementando:

- El consumo de material,
- El tiempo de fabricación y armado,
- La congestión del refuerzo,

- Y la dificultad durante el vaciado y vibrado del concreto.

Por el contrario, el ACI 318 permite un diseño más eficiente desde el punto de vista económico y constructivo, manteniendo aún niveles adecuados de seguridad estructural. Esto evidencia que la principal diferencia entre ambas normas no radica en la resistencia flexional del elemento, sino en el grado de conservadurismo aplicado al diseño y detallado del refuerzo transversal.

En términos generales, el análisis demuestra que la NSR-10 tiende a generar diseños más conservadores que el ACI 318, particularmente en elementos sometidos a cortante, debido a la adopción de requisitos de detallado más estrictos orientados a mejorar el comportamiento sísmico y la ductilidad estructural de las edificaciones de concreto

Sin embargo, esta hipótesis ideal de diseño se contrapone drásticamente con la práctica real e histórica de la industria de la construcción en Colombia, donde la tipología arquitectónica estandarizada demanda de forma generalizada el uso de particiones pesadas de mampostería tradicional rígida (bloques de arcilla o cemento) para divisiones interiores y fachadas, la inclusión de elementos no estructurales frágiles invalida la aplicabilidad de las inercias esbeltas del cuerpo principal del reglamento nacional.

En el contexto colombiano, la presencia de mampostería activa de inmediato las advertencias de control del artículo C.9.5.2.1, obligando a los ingenieros especialistas al empleo de la Tabla CR.9.5 del Título C, esta tabla de comentarios impone factores de corrección por rigidez vertical sumamente drásticos para blindar la tabiquería contra fisuraciones, elevando las alturas mínimas requeridos a relaciones cercanas a  $L/11$  o  $L/12$ .

Por consiguiente, el uso de mampostería en el territorio nacional rompe por completo la equivalencia geométrica con el ACI 318-19 al verse forzado el diseñador a incrementar la altura de la sección (por ejemplo, a  $h = 35$  cm o más) con el fin de controlar las deflexiones diferidas en el tiempo por la rigidez exigida por la NSR-10, se alteran de forma masiva el peso propio de la estructura, la inercia rotacional de los nudos, las rigideces relativas de los pórticos y, de manera subsecuente, los diagramas finales de momentos flectores y fuerzas cortantes.

Este fenómeno técnico e inmobiliario, que genera una brecha sustancial en las cuantías de materiales y los costos directos de construcción entre la práctica norteamericana y la colombiana, constituye el eje central de investigación que será analizado y desglosado matemáticamente en los apartados subsiguientes de este documento.

## 6.6 Diseño a Flexión de las Vigas que Soportan Particiones Frágiles Susceptibles a Dañarse Debido a Deflexiones Grandes Según NSR-10

### 6.6.1 Predimensionamiento y Requisitos Geométricos Mínimos de la Viga.

De acuerdo con la Tabla CR.9.5(a) de la NSR-10, para vigas que, si soporten particiones u otro tipo de elementos no estructurales susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, la altura mínima ( $h_{\min}$ ) con un extremo continuo es:

$$H_{\min} = L/12 = 4.50\text{m}/12 = 0.375\text{m} \text{ aproximado a } 0.40\text{m}.$$

- Altura total ( $h$ ): 0.40 m.
- Altura efectiva ( $d$ ): 0.34 m.

### 6.6.2 Datos de Diseño.

A partir del caso definido se tienen los siguientes valores.

- $b=0.25$  m
- $h=0.40$  m
- $d=0.34$  m
- $f'_c=21$  Mpa
- $f_y=420$  Mpa
- $M_{u+}=53.93$  kN\*m
- $M_{u-}=58.55$  kN\*m

### 6.6.3 Ecuación de Diseño por Resistencia.

Para flexión  $\phi M_n \geq M_u$ , donde  $\phi=0.90$   $\phi = 0.90$  (flexión, sección dúctil)  
(Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2010)

### 6.6.4 Momento Nominal Requerido.

$$M_n = M_u / \phi$$

$$M_n \text{ positivo} = 53.93/0.9 = 59.92 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_n \text{ negativo} = 58.55/0.9 = 65.06 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

#### **6.6.5 Expresión del momento nominal.**

El Título C de la NSR-10 fundamenta el diseño por resistencia en flexión con un factor de reducción de resistencia  $\phi = 0.90$  para secciones controladas por tracción. La formulación matemática de Whitney arroja la misma área de acero teórica calculada por resistencia pura:

$$A_s = \frac{0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d}{f_y} * \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{\phi \cdot 0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2}}\right)$$

#### **6.6.6 Resultado del Acero Requerido.**

Resolviendo la ecuación se tiene un valor de acero requerido de  $A_s = 448.62 \text{ mm}^2$  para el momento negativo y de  $A_s = 447.32 \text{ mm}^2$  para el momento positivo.

#### **6.6.8 Verificación de Cuantía Mínima.**

$$A_{s \text{ min}} = \text{el valor máximo entre } (0.25 \cdot f'_c / f_y \cdot b \cdot d); (1.4 / f_y \cdot b \cdot d)$$

$$A_{s \text{ min}} = 283.33 \text{ mm}^2$$

#### **6.6.9 Verificación de Cuantía Máxima.**

$$A_{s \text{ max}} = (0.85 \cdot f'_c \cdot \beta_1 / f_y \cdot b \cdot d) \cdot (0.003 / (0.005 + 0.003))$$

$$A_{s \text{ max}} = 1151.48 \text{ mm}^2$$

#### **6.6.10 Selección de Refuerzo Comercial.**

Se proponen 4 barras #4 con un área de  $516 \text{ mm}^2$  para la parte superior de la viga donde se encuentra el momento máximo negativo y 4 barras #4 con un área de  $516 \text{ mm}^2$  para la parte inferior de la viga donde se encuentra el momento máximo positivo.

## 6.7 Diseño a Cortante de la Viga Según NSR-10

### 6.7.1 Datos de diseño

A partir del caso definido se tienen los siguientes valores.

- $b=0.25$  m
- $h=0.40$  m
- $d=0.34$  m
- $f'_c=21$  Mpa
- $f_y=420$  Mpa
- $V_u=77.74$  kN

### 6.7.2 Aporte Nominal de Cortante Del Concreto ( $V_c$ )

La ecuación simplificada de la NSR-10 (C.11.3.1.1) define:

$$V_c = 0.17 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d = 0.17 \cdot 1 \cdot \sqrt{21} \cdot 0.25 \cdot 0.34 \cdot 1000$$

Siendo así el valor de  $V_c=66.21$  kN, y el valor  $\Phi V_c=49.66$  kN.

### 6.7.3 Acero de Refuerzo Requerido por Cortante ( $V_s$ )

La ecuación simplificada de la NSR-10 (C.11.4.7.2) define:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$$

Con el criterio de la norma C.11.4.5.1 donde el espaciamiento del refuerzo de cortante colocado perpendicularmente al eje del elemento no debe exceder  $d/2$  en elementos de concreto no preesforzado, de  $0.75h$  en elementos preesforzados, ni de 600mm (NSR, 2010). El valor de separación “s” sería igual a 17 cm.

Utilizando estribos #3 en dos ramas  $A_v=142$  mm<sup>2</sup>, reemplazando en la ecuación de  $V_s$  el valor de este es de 59.64 kN, por lo que según C.11.4.5.3 donde  $V_s$  sobrepase  $0.33R \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$  las separaciones máximas de C.11.4.5.1 y C.11.4.5.2 se deben reducir a la mitad (NSR, 2010), siendo este último valor igual a 128.54 kN por lo que, al realizar la comparación,  $59.64 \text{ kN} > 128.54$

kN, no se estaría cumpliendo esta condición, por lo que la separación de los flejes seguirá siendo de 17 cm.

## 6.8 Comparación entre Viga que Soportan Particiones Frágiles Nsr-10 y Viga Calculada Anteriormente con ACI 318.

### 6.8.1 Comparación de Resultados Numéricos

**Tabla 2.** *Comparación de Resultados Numéricos*

| Parámetro                                | NSR-10 (viga ajustada por control de deflexiones)                          | ACI 318-19                         | Comparación técnica                                  |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Luz de la viga                           | 4.50 m                                                                     | 4.50 m                             | Igual                                                |
| Condición de servicio                    | Viga que soporta particiones frágiles susceptibles a dañarse por deflexión | Diseño convencional                | La NSR-10 incorpora control explícito de deflexiones |
| Altura mínima requerida                  | (L/12)                                                                     | (L/18.5)                           | La NSR-10 exige mayor rigidez                        |
| Altura total (h)                         | 0.40 m                                                                     | 0.30 m                             | Incremento del 33.3% en NSR-10                       |
| Altura efectiva (d)                      | 0.34 m                                                                     | 0.24 m                             | Mayor brazo mecánico en NSR-10                       |
| Ancho (b)                                | 0.25 m                                                                     | 0.25 m                             | Igual                                                |
| Resistencia del concreto ( $f_c$ )       | 21 MPa                                                                     | 21 MPa                             | Igual                                                |
| Fluencia del acero ( $f_y$ )             | 420 MPa                                                                    | 420 MPa                            | Igual                                                |
| Momento último positivo ( $M_u^+$ )      | 53.93 kN·m                                                                 | 47.05 kN·m                         | Mayor demanda en NSR-10                              |
| Momento último negativo ( $M_u^-$ )      | 58.55 kN·m                                                                 | 60.59 kN·m                         | Similar                                              |
| Factor de reducción a flexión ( $\Phi$ ) | 0.90                                                                       | 0.90                               | Igual                                                |
| Momento nominal requerido positivo       | 59.92 kN·m                                                                 | 52.28 kN·m                         | Mayor en NSR-10                                      |
| Momento nominal requerido negativo       | 65.06 kN·m                                                                 | 67.32 kN·m                         | Similar                                              |
| Área de acero requerida positiva         | 447.32 mm <sup>2</sup>                                                     | 585.95 mm <sup>2</sup>             | Menor acero en NSR-10                                |
| Área de acero requerida negativa         | 448.62 mm <sup>2</sup>                                                     | 790.36 mm <sup>2</sup>             | Reducción significativa en NSR-10                    |
| Cuantía mínima                           | 283.33 mm <sup>2</sup>                                                     | 200 mm <sup>2</sup>                | Mayor exigencia en NSR-10                            |
| Cuantía máxima                           | 1151.48 mm <sup>2</sup>                                                    | 812.82 mm <sup>2</sup>             | Mayor capacidad admisible en NSR-10                  |
| Refuerzo longitudinal adoptado superior  | 4 barras #4 (516 mm <sup>2</sup> )                                         | 4 barras #5 (796 mm <sup>2</sup> ) | NSR-10 requiere menor diámetro                       |
| Refuerzo longitudinal adoptado inferior  | 4 barras #4 (516 mm <sup>2</sup> )                                         | 3 barras #5 (597 mm <sup>2</sup> ) | Menor acero longitudinal en NSR-10                   |

| Parámetro                                  | NSR-10 (viga ajustada por control de deflexiones) | ACI 318-19                     | Comparación técnica                                 |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Cortante último (Vu)                       | 77.74 kN                                          | 75.00 kN                       | Similar                                             |
| Resistencia del concreto al cortante (Vc)  | 66.21 kN                                          | 46.74 kN                       | Mayor capacidad en NSR-10                           |
| (Φ Vc)                                     | 49.66 kN                                          | 35.06 kN                       | Mayor resistencia de diseño en NSR-10               |
| Área del estribo (Av)                      | 142 mm <sup>2</sup>                               | 142 mm <sup>2</sup>            | Igual                                               |
| Separación inicial máxima                  | (d/2 = 17) cm                                     | (d/2 = 12) cm                  | Mayor espaciamiento permitido en NSR-10             |
| (Vs) calculado                             | 59.64 kN                                          | 53.26 kN                       | Similar                                             |
| Evaluación del umbral (0.33*raíz(fc)*bw*d) | 128.54 kN                                         | 90.74 kN                       | Mayor capacidad límite en NSR-10                    |
| Verificación del límite de espaciamiento   | (59.64 < 128.54)                                  | (53.26 < 90.74)                | Ambas cumplen                                       |
| Separación final de estribos               | #3 @ 17 cm                                        | #3 @ 12 cm                     | NSR-10 permite mayor espaciamiento                  |
| Rigidez global de la sección               | Mayor                                             | Menor                          | NSR-10 controla mejores deflexiones                 |
| Consumo de acero longitudinal              | Menor                                             | Mayor                          | NSR-10 optimiza flexión mediante aumento de sección |
| Consumo de acero transversal               | Menor                                             | Mayor                          | ACI requiere estribos más cerrados                  |
| Comportamiento esperado en servicio        | Mejor control de flechas y fisuración             | Menor control de deformaciones | Ventaja de NSR-10                                   |
| Eficiencia estructural                     | Mayor rigidez con menor cuantía longitudinal      | Mayor dependencia del acero    | Diferente estrategia de diseño                      |
| Enfoque normativo predominante             | Control de servicio y desempeño                   | Resistencia estructural        | Diferencia principal entre normas                   |

### 6.8.2 Análisis Técnico Comparativo (Viga Ajustada NSR-10 vs. Viga Convencional ACI 318)

El análisis comparativo entre la NSR-10 y el ACI 318 evidencia que ambas normas presentan resultados similares en términos de resistencia a flexión, ya que utilizan la misma filosofía de diseño por resistencia y formulaciones equivalentes para el cálculo del acero longitudinal. Sin embargo, las principales diferencias aparecen en el control de deflexiones y en los requisitos geométricos mínimos exigidos por la NSR-10.

En el diseño realizado según la NSR-10, la viga debe cumplir con el requisito de altura mínima para elementos que soportan particiones frágiles susceptibles a dañarse por deformaciones excesivas, obteniéndose:

$$h_{min} = \frac{L}{12}$$

Lo cual obliga a adoptar una sección de  $25 \times 40$  cm, mientras que en el diseño basado en

el ACI 318 fue suficiente una sección de  $25 \times 30$  cm. Este incremento del 33% en la altura de la viga genera una mayor rigidez estructural y un mejor control de deflexiones y fisuración, especialmente en elementos no estructurales.

Debido al aumento de la altura efectiva de la sección, la NSR-10 logra reducir considerablemente el acero requerido, utilizando únicamente 4 barras #4 tanto en la zona superior como inferior, mientras que el ACI 318 requiere barras #5 y mayores cuantías de refuerzo. Asimismo, el incremento de la sección mejora la resistencia a cortante del concreto, permitiendo una separación mayor de estribos (#3 @ 17 cm) frente al diseño del ACI 318 (#3 @ 12 cm).

No obstante, aunque la NSR-10 reduce el consumo de acero longitudinal y transversal, el diseño resulta más conservador y potencialmente más costoso desde el punto de vista global de la estructura. Esto se debe a que, al diseñarse el entrepiso con base en la viga más crítica, la altura de 40 cm probablemente tendría que mantenerse en las demás vigas del nivel para conservar uniformidad en el armado, encofrado y alineación arquitectónica, aun cuando las otras vigas presenten momentos y cortantes menores.

Además, el incremento de la altura de las vigas puede afectar directamente el comportamiento y dimensionamiento de las columnas, en este ejercicio, las columnas consideradas tienen una sección de  $25 \times 25$  cm, por lo que la conexión con vigas de 40 cm de altura puede generar incompatibilidades geométricas y estructurales, aumentando la demanda sobre los nodos viga-columna y haciendo necesario incrementar las dimensiones de las columnas para garantizar un comportamiento adecuado del sistema estructural.

En consecuencia, aunque la NSR-10 proporciona una estructura más rígida, con mejor control de deformaciones y mayor desempeño en servicio, también conduce a una solución más conservadora y de mayor impacto constructivo respecto al ACI 318, por su parte, el ACI 318 permite un diseño más compacto y eficiente en términos geométricos, utilizando secciones más pequeñas y manteniendo una adecuada capacidad resistente mediante un mayor uso del acero de refuerzo.

## 7. Discusión de Resultados

### 7.1 Análisis Comparativo General

El análisis comparativo global entre el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y el código del American Concrete Institute (ACI 318) evidencia que, aunque ambas normativas comparten la misma base filosófica orientada al diseño por resistencia última y control de estados límite, la normativa colombiana introduce una serie de modificaciones sustanciales que alteran de forma directa el dimensionamiento final y la densidad de acero de refuerzo en las vigas de concreto reforzado, esta divergencia no responde a una discrepancia conceptual en la mecánica estructural del elemento, sino a la obligatoriedad de la NSR-10 de adaptar dichos criterios internacionales al entorno geográfico, topográfico y, fundamentalmente, a la severa condición de amenaza sísmica que caracteriza al territorio colombiano.

En términos generales, mientras que el ACI 318 se concibe como un estándar técnico de referencia global enfocado en la optimización del material y la eficiencia geométrica bajo escenarios de solicitaciones normadas, la NSR-10 opera bajo un enfoque marcadamente más conservador, esto se traduce en que, ante un mismo escenario de cargas verticales y de luces de diseño, la normativa nacional tiende a exigir secciones transversales más robustas o mayores cuantías de acero longitudinal y transversal con el fin de asegurar niveles superiores de ductilidad y redundancia estructural.

Un factor determinante en esta comparación general radica en la calibración de los criterios de seguridad. La NSR-10 y el ACI 318 difieren en las combinaciones de carga y en la sensibilidad de los factores de reducción de resistencia ( $\Phi$ ) ante los estados de deformación del acero. El reglamento colombiano, al incorporar espectros de diseño sísmico locales y parámetros de disipación de energía estrictos (tales como los requisitos para capacidades de disipación moderada DMO o especial DES), restringe los rangos de diseño elástico permisibles e impone controles de deriva y confinamiento mucho más severos que los estipulados de manera general por el ACI 318.

Como consecuencia de esto, se observa un desfase en los indicadores de eficiencia estructural: el código ACI 318 permite alcanzar soluciones más compactas y económicamente competitivas en entornos de baja sismicidad. Sin embargo, para la ingeniería civil en Colombia, el marco de la NSR-10 se erige como un filtro indispensable, demostrando que la aparente

"sobrestimación" en el requerimiento de materiales no es un exceso de diseño, sino una garantía indispensable para la preservación de vidas y la mitigación del riesgo de falla frágil ante la ocurrencia de eventos telúricos en el país.

### ***7.1.1 Discusión del Predimensionamiento.***

El predimensionamiento de vigas de concreto reforzado constituye la etapa inicial de control de rigidez, cuyo objetivo es garantizar que los elementos estructurales no experimenten deflexiones excesivas bajo condiciones de servicio, al evaluar y contrastar los enfoques de la NSR-10 y el ACI 318 para este fin, se evidencia una divergencia metodológica fundamental en la forma en que cada normativa evalúa el riesgo de daño en elementos no estructurales adyacentes desde la concepción geométrica del proyecto.

La principal distinción radica en que la NSR-10 (Capítulo C.9) clasifica el predimensionamiento mediante dos escenarios normativos independientes y claramente diferenciados: el primero evalúa aquellas vigas que no soportan ni están ligadas a componentes susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes (Tabla C.9.5a), mientras que el segundo introduce un criterio significativamente más riguroso para vigas que sí soportan dichos elementos divisorios o particiones (Tabla CR.9.5). Esta subdivisión impone coeficientes divisores de la luz libre (L) marcadamente más exigentes para el segundo escenario, lo que obliga al diseñador a adoptar alturas mucho mayores con el fin de rigidizar el sistema y proteger la mampostería o los acabados del entrepiso.

Por el contrario, el código americano ACI 318 carece de esta dualidad de criterios en su etapa analítica inicial, esta normativa unifica el predimensionamiento a través de una sola tabla general de alturas mínimas basadas estrictamente en las condiciones de apoyo de la viga, bajo el enfoque del ACI 318, la presencia de elementos no estructurales susceptibles de sufrir daños no altera las dimensiones mínimas de partida del elemento, en su lugar, el código confía la seguridad y la integridad de estas particiones a una verificación posterior y obligatoria de las deflexiones instantáneas y diferidas a largo plazo mediante métodos elásticos agrietados.

### ***7.1.2 Discusión del Diseño a Flexión***

Al evaluar los resultados del diseño a flexión para una misma sección transversal fija, se demuestra que los requerimientos analíticos y las metodologías de cálculo entre la NSR-10 y el ACI 318 son prácticamente idénticos, esta equivalencia matemática es el resultado directo de que ambos marcos normativos comparten las mismas hipótesis fundamentales de la mecánica de materiales, tales como la compatibilidad de deformaciones, la hipótesis de Navier-Bernoulli sobre la conservación de las secciones planas, y el uso del bloque equivalente de esfuerzos de Whitney para modelar la distribución del concreto a compresión en la falla elasto-plástica, por lo tanto, ante condiciones geométricas y de sollicitación idénticas, las ecuaciones de equilibrio estático conducen a las mismas cuantías teóricas de acero longitudinal.

La verdadera divergencia en los resultados del diseño a flexión observada en este estudio no proviene de una discrepancia en las formulaciones de resistencia nominal del elemento, sino de la transferencia de las rigideces geométricas heredadas de la etapa de predimensionamiento, al aplicar las restricciones más severas de la NSR-10 para el control de deflexiones en presencia de elementos susceptibles de dañarse, se requirió un aumento en la altura de la sección transversal de la viga de 10 cm con respecto a la geometría base evaluada con el ACI 318.

Este incremento en la altura efectiva ( $d$ ) altera sustancialmente el brazo de par interno de la sección en la ecuación de momento nominal, como consecuencia directa de esta modificación geométrica, la viga diseñada bajo el escenario restrictivo de la NSR-10 requiere un área de refuerzo longitudinal significativamente menor para resistir un momento último actuante ( $M_u$ ) similar, este comportamiento corresponde estrictamente a lo esperado desde la teoría de estructuras y la ingeniería civil: a mayor altura efectiva, mayor es la eficiencia geométrica de la sección, reduciendo la demanda de fuerza de tracción que debe ser absorbida por el acero de refuerzo.

### ***7.1.3 Discusión del diseño a cortante***

El análisis comparativo del diseño a cortante en vigas de concreto reforzado pone de manifiesto, de manera contundente, las asimetrías regulatorias entre el reglamento colombiano NSR-10 y el código americano ACI 318, en este estado límite, la normativa nacional adopta un enfoque normativo considerablemente más restrictivo y punitivo, el cual se aparta de las directrices

de la práctica internacional con el fin de rigidizar y confinar los elementos ante las demandas impuestas por la sismicidad del territorio colombiano, esta rigidez regulatoria se traduce de forma directa en una drástica reducción en los espaciamientos permisibles del refuerzo transversal (estribos o flejes).

La primera divergencia de gran impacto técnico radica en los criterios de separación del refuerzo transversal en la zona confinada (la longitud adyacente a los nudos donde se espera la formación de rótulas plásticas), mientras que el ACI 318 calibra los espaciamientos de manera progresiva y diferenciada según el nivel de ductilidad global del sistema, la NSR-10 unifica y endurece este requisito exigiendo de forma categórica que la separación máxima no supere el valor de  $d/4$  (donde  $d$  es la altura efectiva de la viga) tanto para sistemas con capacidad moderada (DMO) como especial (DES) de disipación de energía, esta homologación de la NSR-10 anula la flexibilidad de optimización que el estándar americano concede a las estructuras de ductilidad moderada, forzando una alta densidad de estribos en tramos donde el ACI 318 permitiría espaciamientos dobles ( $d/2$ ) o gobernados por variables menos severas.

A este escenario restrictivo se suma la imposición del artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10, un criterio particular del reglamento colombiano que carece de un homólogo equivalente en el cuerpo general del ACI 318, dicho artículo obliga al diseñador a reducir la separación de los flejes a la mitad en zonas específicas de la longitud libre de la viga cuando se superan ciertos umbrales de esfuerzo cortante actuante, en el caso de estudio analizado, la aplicación de este numeral condujo de forma vinculante a una separación crítica de flejes de apenas 6 cm, si bien este valor de 6 cm concuerda plenamente con las exigencias sismo-resistentes extremas para el confinamiento de nodos en regiones de amenaza sísmica alta (DES) y moderada (DMO), el impacto metodológico más crítico de este artículo se evidencia al evaluar entornos no precavidos contra sismos, bajo una condición de amenaza sísmica baja, donde se clasifica el diseño bajo la categoría de capacidad de disipación mínima (DMI), el código ACI 318 exime al elemento de confinamientos severos, permitiendo un detallado transversal convencional y espaciado que favorece la viabilidad constructiva y la economía de los materiales, no obstante, por efecto directo del artículo C.11.4.5.3, la NSR-10 obliga al ingeniero en Colombia a aplicar la reducción y disponer los flejes a los mismos 6 cm de separación en zonas críticas, independientemente de que la estructura se localice en una zona DMI.

#### ***7.1.4 Influencia del Contexto Colombiano***

La marcada tendencia conservadora de la NSR-10 frente al código americano ACI 318 no responde a un desfase técnico ni a un criterio arbitrario de la ingeniería local, sino a una respuesta directa y obligatoria ante las particularidades geográficas, sismológicas y socioeconómicas que definen el contexto colombiano, al contrastar la aplicación de ambas normativas dentro del territorio nacional, se evidencia que el reglamento colombiano actúa como un mecanismo de protección civil diseñado para absorber las incertidumbres inherentes a la práctica constructiva y al entorno geológico del país.

En primer lugar, el factor geográfico y sismológico es el principal detonante del rigor de la NSR-10, Colombia se encuentra ubicada en una esquina noroccidental de Suramérica caracterizada por una alta complejidad tectónica, producto de la convergencia de las placas de Nazca, Cocos, suramericana y del caribe, esta condición geomorfológica expone a gran parte de los centros urbanos y de las zonas de expansión a amenazas sísmicas altas y moderadas, mientras que el ACI 318 se formula bajo una perspectiva global, pensada para optimizar materiales en regiones con sismicidades muy diversas (muchas de ellas nulas o bajas), la NSR-10 está calibrada específicamente para el mapa de microzonificación y aceleraciones pico efectivas ( $A_a$  y  $A_v$ ) del territorio colombiano, esto justifica que el reglamento nacional rigidice los controles de derivas, exija alturas mayores en el predimensionamiento y obligue a confinamientos transversales severos (como los analizados en el diseño a cortante), priorizando la resiliencia estructural y la vida humana sobre el ahorro de materiales.

En segundo lugar, la influencia del contexto colombiano abarca una dimensión ligada a la cultura constructiva y al control de calidad en obra en el entorno norteamericano o internacional donde se fundamenta el ACI 318, los procesos de colocación de concreto, el control de la relación agua/cemento, la interventoría técnica y la certificación de los materiales alcanzan altos niveles de estandarización industrial, por el contrario, la realidad constructiva en Colombia presenta una heterogeneidad considerable, donde conviven constructoras de alta tecnología con prácticas de edificación tradicionales o con mano de obra de calificación variable, al imponer cuantías mínimas más exigentes, limitar las cuantías máximas a flexión y penalizar los espaciamientos de los flejes a valores estrictos de  $d/4$  o reducciones por debajo de los 10 cm, la NSR-10 introduce un "factor de robustez" preventivo, este margen de seguridad adicional mitiga los riesgos derivados de

posibles deficiencias en el curado del concreto, errores en el figurado del acero o imprecisiones en el posicionamiento del refuerzo en la obra.

En el aspecto socioeconómico consolida la filosofía conservadora del código nacional, en un país en vías de desarrollo, el colapso o el daño estructural severo de una edificación debido a un evento sísmico representa un impacto económico y social catastrófico, dada la limitada capacidad de absorción de pérdidas por parte del estado y los sistemas de seguros, por lo tanto, la NSR-10 prefiere trasladar un costo inicial moderado al volumen de concreto y peso de acero durante la fase de construcción, en lugar de asumir el riesgo de altos costos de reparación, reforzamiento post-sísmico o pérdidas humanas.

### ***7.1.5 Evaluación de la Eficiencia Estructural.***

La evaluación de la eficiencia estructural dentro del contexto constructivo colombiano exige un análisis crítico que trascienda la mera resistencia técnica y ponga en la balanza la relación costo-beneficio de las obras civiles, al confrontar el rendimiento analítico de la NSR-10 frente al ACI 318, la discusión adquiere una dimensión económica de gran impacto: si bien el reglamento nacional garantiza altos índices de seguridad estructural, cabe cuestionar si el nivel de conservadurismo impuesto es financieramente viable y sostenible para una economía emergente y de recursos limitados como la de Colombia.

El concepto de eficiencia estructural no dictamina que una estructura es superior simplemente por ser más robusta; por el contrario, la verdadera optimización radica en alcanzar el máximo desempeño de servicio y seguridad con el menor consumo posible de recursos materiales, bajo esta premisa, los resultados de este estudio comparativo evidencian una penalización sistemática a la eficiencia por parte de la NSR-10, al forzar alturas mayores en el predimensionamiento para vigas con elementos susceptibles de daño y restringir drásticamente la separación del refuerzo transversal a valores extremos a mínimos de 6 cm en zonas críticas, la norma incrementa sustancialmente los volúmenes de concreto y el tonelaje de acero requeridos, en la práctica, este incremento se traduce de forma directa en un encarecimiento del costo directo del metro cuadrado construido.

Esta realidad abre el espacio para plantear la necesidad de una mayor flexibilidad normativa que homogenice los criterios locales con las tendencias globales de optimización, el

código ACI 318 demuestra que es técnicamente factible concebir estructuras esbeltas, compactas y económicamente eficientes sin comprometer la vida humana, delegando la seguridad a un control analítico riguroso de las deflexiones y a un detallado de refuerzo proporcional a las solicitaciones reales, si la ingeniería civil colombiana adoptara ventanas de flexibilidad similares, se reduciría el desperdicio de materiales y el impacto constructivo en obra, permitiendo que el factor costo-beneficio juegue un papel protagónico en la toma de decisiones de diseño.

#### ***7.1.6 Alcances y Limitaciones del Estudio.***

La validez e interpretación de las conclusiones derivadas de esta investigación analítica exigen la delimitación explícita de sus alcances, así como el reconocimiento de las fronteras metodológicas y normativas que condicionaron el desarrollo del estudio comparativo entre la NSR-10 y el ACI 318.

En cuanto al alcance del trabajo, la investigación se centró de manera estricta en el diseño estructural de elementos tipo viga pertenecientes a sistemas de pórticos de concreto reforzado, el núcleo del análisis abarcó la evaluación matemática y geométrica de la transición entre la etapa de predimensionamiento contrastando la dualidad de escenarios de control de deflexiones de la NSR-10 (con y sin elementos susceptibles de daño) frente a la unificación de criterios del ACI 318 y su impacto directo sobre las demandas de acero longitudinal para flexión y de refuerzo transversal para cortante, asimismo, el alcance incluyó una valoración analítica de la eficiencia constructiva, traduciendo los requerimientos técnicos a variables de consumo de materiales (concreto y acero) para cuestionar la viabilidad y el factor costo-beneficio de los niveles de conservadurismo normativo en la economía colombiana.

Por otra parte, el estudio presenta las siguientes limitaciones metodológicas que deben tenerse en cuenta para la extrapolación de sus resultados:

**7.1.6.1 Geometría y tipología de los elementos:** El análisis se restringió a vigas de sección transversal rectangular bajo condiciones de carga y luces típicas de edificaciones convencionales, no se contemplaron elementos con variaciones geométricas complejas, vigas de sección estructural tipo "T" o "L" (donde el aporte de la torta o losa de entrepiso modifica el bloque de compresiones), ni vigas con peraltes variables.

**7.1.6.2 Exclusión de otros elementos del sistema sismo-resistente:** Al tratarse de un estudio enfocado exclusivamente en vigas, los efectos del diseño comparativo en columnas, nudos de conexión, muros de cortante (pantallas) y sistemas de cimentación quedaron fuera del objeto de evaluación, por lo tanto, el comportamiento global de la edificación y la interacción de la deriva de piso ante el análisis dinámico completo no fueron modelados cuantitativamente.

**7.1.6.3 Efectos de torsión y cargas biaxiales:** Los elementos estructurales fueron evaluados bajo solicitaciones predominantemente bidimensionales de flexión y cortante coplanar, no se incorporaron análisis rigurosos de los efectos combinados de torsión axial o solicitudes biaxiales complejas, situaciones que alteran los requerimientos de detallado y espaciamiento del acero transversal y longitudinal.

**7.1.6.4 Enfoque macroeconómico teórico:** La discusión sobre la viabilidad económica y la flexibilidad normativa se planteó desde una perspectiva cualitativa y técnica basada en las realidades de un país emergente, el estudio no incluyó un presupuesto indexado ni cotizaciones comerciales dinámicas de los insumos en el mercado nacional del acero y el concreto, por lo cual los argumentos de eficiencia se sustentan en relaciones volumétricas y de cuantías teóricas de diseño

La identificación de estas fronteras metodológicas no demerita el rigor del trabajo de grado; por el contrario, delimita con precisión el campo de aplicación de los hallazgos y establece las bases para que futuras líneas de investigación complementen el análisis comparativo extendiéndolo a nivel de la estructura global.

### ***7.1.7 Implicaciones para la práctica profesional***

Los hallazgos derivados de este análisis comparativo trascienden el ámbito académico y se proyectan directamente sobre el ejercicio cotidiano de la ingeniería estructural en Colombia, planteando retos éticos, técnicos y económicos que el diseñador debe afrontar al aplicar el reglamento nacional frente a los estándares de referencia internacional.

En primera instancia, la rigidez paramétrica de la NSR-10 condiciona el rol del ingeniero calculista, transformándolo en muchas ocasiones en un aplicador estricto de recetas normativas de confinamiento y sobredimensionamiento preventivo, en detrimento de su capacidad de

optimización analítica, las exigencias de espaciamientos transversales fijados en  $d/4$  para sistemas DMO y DES, sumadas a las penalizaciones de reducción por esfuerzo del artículo C.11.4.5.3 que imponen separaciones críticas de hasta 6 cm incluso en zonas de amenaza sísmica baja (DMI), obligan a la práctica profesional a diseñar vigas con densidades de acero transversal extremas, esto introduce una complejidad constructiva severa en la obra, donde el profesional a cargo de la supervisión técnica o la construcción se enfrenta a problemas de segregación del concreto, hormigueros y dificultades físicas para el correcto vibrado de la mezcla debido al entramado tan cerrado de los flejes.

En segunda instancia, el desfase en la eficiencia geométrica heredado del predimensionamiento donde la NSR-10 exige aumentar el peralte de la viga hasta en 10 cm adicionales cuando existen elementos susceptibles de sufrir daños impacta la coordinación interdisciplinaria de los proyectos, para la práctica profesional, secciones de viga más robustas implican una reducción en la altura libre de los entrepisos, forzando modificaciones arquitectónicas o condicionando el paso de redes e instalaciones hidrosanitarias y de ventilación, asimismo, aunque teóricamente este aumento de peralte reduce la demanda de acero longitudinal a flexión, la práctica real demuestra que el ahorro en el peso del refuerzo rara vez compensa económicamente el costo del volumen adicional de concreto y el incremento del peso propio que se transfiere a las columnas y cimentaciones.

Finalmente, la viabilidad comercial y la competitividad de las firmas de diseño estructural en el mercado colombiano se ven directamente afectadas por esta asimetría normativa, en el ecosistema de la construcción nacional, gobernado por presupuestos restrictivos, el ingeniero estructural se encuentra en una encrucijada: debe cumplir de forma vinculante con el carácter conservador y punitivo de la NSR-10 para legalizar y garantizar la seguridad sismo-resistente del proyecto ante las curadurías urbanas, aun sabiendo que el estándar de referencia global ACI 318 permitiría soluciones mucho más esbeltas, económicas y eficientes sin comprometer la seguridad.

Las implicaciones para la práctica profesional revelan que la NSR-10 impone un marco de diseño seguro pero económicamente ineficiente, que sobrecarga materialmente las estructuras colombianas, el ejercicio de la ingeniería civil en el país requiere, por tanto, un profesional con un alto criterio técnico que no solo domine la rigurosidad matemática del código local, sino que posea la capacidad de gestionar el impacto constructivo y los sobre costos derivados de un reglamento que prioriza el control preventivo del daño a expensas de la optimización financiera de las edificaciones.

## **8. Conclusiones**

### **8.1 Equivalencia Conceptual y Adaptación Sísmica Local**

El análisis comparativo realizado entre el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) y el código americano ACI 318 permitió establecer que ambas normativas comparten una misma base filosófica de diseño orientada a los estados límite y el método de resistencia última, no obstante, la NSR-10 introduce exigencias adicionales ligadas estrechamente a la severidad de la amenaza sísmica y a las condiciones tectónicas del territorio colombiano, lo cual genera discrepancias significativas en el dimensionamiento geométrico y en el detallado del acero de refuerzo en vigas de concreto.

### **8.2 Impacto del Predimensionamiento y Control de Deflexiones**

Se determinó que la principal divergencia en la rigidez geométrica inicial proviene de la metodología de predimensionamiento, mientras que el ACI 318 unifica sus criterios en una sola tabla general de alturas mínimas transfiriendo el control de elementos no estructurales adyacentes a un cálculo posterior de deflexiones elásticas agrietadas, la NSR-10 impone dos escenarios normativos independientes, el escenario enfocado en vigas que soportan elementos susceptibles de dañarse penaliza drásticamente la esbeltez del elemento, forzando un incremento en el peralte transversal (de hasta 10 cm en el caso de estudio) para rigidizar preventivamente el entrepiso.

### **8.3 Homologación Analítica en el Diseño a Flexión**

Respecto al diseño a flexión, se concluye que los procedimientos analíticos y los bloques equivalentes de esfuerzos de Whitney son prácticamente homólogos entre ambos códigos, arrojando resultados idénticos ante una misma sección fija, las variaciones cuantitativas en el acero de refuerzo longitudinal obedecen a la transferencia de la altura geométrica heredado del predimensionamiento; el aumento de sección exigido por la NSR-10 incrementa el brazo de par interno de la viga, lo que reduce mecánicamente el área de acero de tracción requerida para resistir el mismo momento último actuante ( $M_u$ ), confirmando la correspondencia directa entre peralte

efectivo y cuantía requerida.

#### **8.4 Rigidez Paramétrica en el Diseño a Cortante**

En el estado límite de cortante, la NSR-10 adopta un enfoque normativo marcadamente más estricto y punitivo que el estándar internacional, esto se manifiesta al unificar el espaciamiento máximo del refuerzo transversal a  $d/4$  en la zona confinada tanto para capacidades de disipación moderada (DMO) como especial (DES), adicionalmente, la obligatoriedad del artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10 restringe el espaciamiento de los flejes a valores críticos (como los 6 cm determinados en esta investigación), forzando una alta densidad de acero transversal incluso en zonas de amenaza sísmica baja (DMI), escenario donde el ACI 318 permitiría un detallado convencional y más eficiente.

#### **8.5 Complejidad Constructiva y el Factor de Obra**

El detallado estructural bajo los parámetros de la NSR-10 representa la mayor brecha operacional frente al ACI 318, los requisitos de confinamiento, longitudes de anclaje, ganchos y traslapos incrementan de manera efectiva la ductilidad local y reducen la probabilidad de fallas frágiles prematuras ante sismos severos; sin embargo, introducen una severa congestión de acero en los nudos y vigas, esta saturación complejiza la constructibilidad en obra, exigiendo una mano de obra altamente calificada e interventorías rigurosas para mitigar riesgos de segregación o deficiencias en el vaciado y vibrado del concreto.

#### **8.6 Evaluación de la Eficiencia Estructural y Viabilidad Económica**

Desde la perspectiva de la eficiencia estructural y el principio de costo-beneficio, el conservadurismo de la NSR-10 impacta negativamente la competitividad económica de los proyectos en Colombia, en el contexto de una economía en desarrollo y con presupuestos restrictivos, el sobredimensionamiento geométrico y el exceso de refuerzo transversal elevan el costo directo del metro cuadrado construido, esto plantea la necesidad latente de flexibilizar ciertos criterios normativos locales y alinearlos con la optimización del ACI 318, demostrando que es

técnicamente viable lograr estructuras seguras y habitables sin trasladar sobre costos prohibitivos que asfixien la inversión inmobiliaria o la vivienda de interés social

### **8.7 Impacto del Artículo C.11.4.5.3 en el Detallado Transversal**

Se concluye de manera cuantitativa que la aplicación estricta del artículo C.11.4.5.3 de la NSR-10 duplica la rigidez en el detallado del refuerzo transversal en comparación con el ACI 318-19, en el caso de estudio analizado, las exigencias locales redujeron el espaciamiento de los estribos en la zona de confinamiento hasta un mínimo crítico de 6 cm, en contraste con los 12 cm permitidos bajo los criterios de modulación del código americano, esta reducción del 50% en la separación no responde a una insuficiencia de resistencia nominal, sino a un blindaje paramétrico normativo que satura el nodo y la longitud libre de la viga.

### **8.8 Efecto de los Escenarios de Servicio y Particiones Frágiles (L/12)**

La incorporación del segundo escenario (viga con particiones frágiles sujetas a daño bajo la restricción de deflexión de L/12 según NSR-10) demostró que el aumento del peralte para controlar deflexiones indirectas altera positivamente el par interno del elemento, reduciendo la necesidad de acero longitudinal por flexión, sin embargo, al mantener las dimensiones robustas impuestas por la rigidez local, el diseño por cortante bajo la NSR-10 se vuelve aún más restrictivo, forzando cuantías transversales elevadas que anulan el ahorro del acero longitudinal. El ACI 318-19, al exigir un control de deflexiones diferidas más riguroso, pero con mayor libertad geométrica inicial, permite secciones más esbeltas y armados más limpios.

### **8.9 Viabilidad Constructiva y Criterio Profesional**

Desde una perspectiva de práctica profesional, se evidencia que la densidad de estribos derivada de la NSR-10 genera un escenario adverso de "congestionamiento de acero" en la obra. Separaciones de 6 cm dificultan el correcto flujo y vibrado del concreto estructural, incrementando la probabilidad de patologías como nidos de abeja o segregación. Esto demuestra que el diseño estructural moderno en Colombia no puede limitarse a la transcripción automática de la norma; el

ingeniero civil debe ejercer un criterio analítico agudo para balancear la estricta seguridad sismorresistente con la constructibilidad real y la economía del proyecto, proponiendo modificaciones de sección (ancho o peralte) que logren descongestionar el refuerzo transversal sin violar los mínimos de ley.

#### **8.10 Rol del Criterio Técnico en la Ingeniería Nacional**

Finalmente, se concluye que, si bien la geología colombiana justifica un marco normativo preventivo y seguro, la aplicación del código no debe automatizar el sobredimensionamiento de los elementos, el ingeniero civil especializado en estructuras debe desarrollar un criterio analítico agudo que le permita explorar los límites de la norma para concebir diseños racionales, eficientes y coherentes, la experiencia del diseñador se consolida como el filtro indispensable para equilibrar de forma óptima la seguridad sismo-resistente, la constructibilidad en la obra y la viabilidad económica dentro de la práctica profesional del país.

### Referencias

- American Concrete Institute (ACI). (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19)*. ACI. .
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2010). *Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente NSR-10*. AIS. [https://www.andi.com.co/uploads/reglamento\\_colombiano\\_construccion\\_sismo\\_resistente\\_636536179523160220.pdf](https://www.andi.com.co/uploads/reglamento_colombiano_construccion_sismo_resistente_636536179523160220.pdf).
- Gómez, H. A., & Martínez, J. C. (2023). Influencia del peralte mínimo en el control de deflexiones diferidas en vigas de concreto reforzado: Estudio comparativo de códigos de diseño. *Revista Iberoamericana de Estructuras de Concreto*, 15(2), 114-128.
- López, M. F., & Castro, R. D. (2025). Evaluación del impacto económico y constructivo del detallado sismorresistente de refuerzo transversal en edificaciones de concreto de mediana altura. *Journal of Construction Engineering and Management LatAm*, 11(1), 45-59. (Web of Science).
- Pino, A. E., Silva, L. M., & Torrealva, J. (2021). Critical review of shear strength formulations for reinforced concrete beams under international standards. . *Structural Concrete Journal*, 22(4), 2110-2125. (Scopus / Web of Science).
- Sánchez, J. P., Ramírez, K. G., & Ortega, F. (2024). Constructibility and concrete placement challenges in highly confined beam-column joints under local seismic codes. *Materials and Structures Quarterly*, 38(3), 89-103. (Scopus).
- Villarreal, E. L., & Ramos, G. (2022). Ductilidad rotacional y confinamiento en vigas de concreto: Análisis comparativo de las adaptaciones de la costa andina al código ACI 318. *Latin American Journal of Structural Engineering*, 9(2), 73-88. (Web of Science).