



**Efectos de la altura y rigidez en los modos de vibración de edificaciones regulares de
concreto reforzado**

Wilmer Alberto Nieto Méndez

Ricardo José Izquierdo Ballesta

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Romis Fernando Vides Pena, Magíster (MSc) en Ingeniería sísmica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Izquierdo Ballesta & Nieto Méndez, 2024)
Referencia	Izquierdo Ballesta, R. J., & Nieto Méndez, W. A. (2024). <i>Efectos de la altura y rigidez en los modos de vibración de edificaciones de concreto reforzado</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.

Grupo de Investigación Infraestructura (GII).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	7
Abstract	8
Introducción	9
1. Planteamiento del problema	10
1.1 Antecedentes	11
2. Justificación.....	16
3. Objetivos	17
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
4. Hipótesis.....	18
5. Marco teórico	19
6. Metodología	22
6.1 Descripción de las edificaciones y parámetros sísmicos del caso de estudio	23
7. Resultados	29
7.1 Ajuste del cortante en la base.....	29
7.2 Análisis modal.....	31
8. Discusión.....	36
8.1 Análisis del ajuste del cortante en la base.....	36
8.1.1 Secciones brutas vs fisuradas.....	36
8.1.2 Misma sección vs Altura.....	36
8.2 Análisis modal.....	36
8.2.1 Secciones brutas vs Secciones fisuradas.....	36
8.2.2 Misma sección vs Altura.....	37

9. Conclusiones	39
Referencias	42

Lista de tablas

Tabla 1. Geometría y resistencia de los elementos	23
Tabla 2. Parámetros sísmicos	28
Tabla 3. Espectro de aceleración Medellín – suelo tipo D.....	28
Tabla 4. Ajuste del cortante en la base para estructura de 5 niveles sin fisurar y fisurada	29
Tabla 5. Ajuste del cortante en la base para estructura de 10 niveles sin fisurar y fisurada	30
Tabla 6. Ajuste del cortante en la base para estructura de 15 niveles sin fisurar y fisurada	30
Tabla 7. Ajuste del cortante en la base para estructura de 20 niveles sin fisurar y fisurada	31
Tabla 8. Análisis modal para estructura de 5 niveles sin fisurar y fisurada	32
Tabla 9. Análisis modal para estructura de 10 niveles sin fisurar y fisurada	33
Tabla 10. Análisis modal para estructura de 15 niveles sin fisurar y fisurada	34
Tabla 11. Análisis modal para estructura de 20 niveles sin fisurar y fisurada	35

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Periodos de vibración péndulos simples (Domínguez, 2014).....	12
Ilustración 2. Planta típica de la estructura	21
Ilustración 3. Vista corte C-C 5 niveles	24
Ilustración 4. Vista corte C-C 10 niveles	25
Ilustración 5. Vista corte C-C 15 niveles	26
Ilustración 6. Vista corte C-C 20 niveles	27

Resumen

El documento examina el impacto de dos factores clave en el comportamiento dinámico de las estructuras regulares de edificaciones de concreto reforzado: la altura y la rigidez de sus elementos estructurales. Este estudio se centra en cómo estos factores influyen en los modos de vibración de las edificaciones de concreto reforzado, utilizando modelos numéricos generados en el software ETABS® para simular el comportamiento de estructuras de concreto reforzado con diferentes consideraciones en la rigidez que ofrecen los elementos, específicamente con secciones brutas (sin fisurar) y con secciones fisuradas.

A medida que aumenta la altura de un edificio, se incrementa su flexibilidad y, por lo tanto, su período de vibración. Los edificios más altos distribuyen más masa a mayores distancias del suelo, lo que provoca un aumento en la inercia y en el tiempo necesario para completar una oscilación. En cuanto a la rigidez, las secciones fisuradas tienen una menor rigidez frente a las fuerzas dinámicas, lo que resulta en un período de vibración mayor en comparación con las secciones sin fisurar, donde la rigidez original se mantiene intacta.

El análisis también revela, para las estructuras analizadas, que la participación de masa en los modos principales de vibración (direcciones traslacionales en planta X, Y y rotacional con respecto al eje Z) no varía significativamente entre secciones brutas y fisuradas. Esto implica que, aunque la rigidez disminuye en las secciones fisuradas, la manera en que la masa se moviliza en respuesta a las vibraciones se mantiene similar. Asimismo, la altura del edificio, si bien afecta la magnitud de los períodos de vibración, no altera de manera significativa la participación de masa siempre que la distribución estructural se mantenga constante.

El estudio concluye que, para las estructuras analizadas, el uso de secciones fisuradas reduce la rigidez y aumentan el período de vibración, pero no afectan significativamente los porcentajes de participación de masa. En cuanto a la altura, esta incrementa la flexibilidad de la estructura, pero si el diseño estructural es uniforme, la participación de masa en los modos de vibración se mantiene constante. Estos hallazgos son esenciales para el diseño sismorresistente de edificaciones de concreto reforzado, subrayando la importancia de considerar tanto la rigidez efectiva de las secciones fisuradas como el comportamiento dinámico en edificaciones de mayor altura.

Palabras clave: altura, rigidez, concreto reforzado, modos de vibración, secciones fisuradas, diseño sismorresistente.

Abstract

The document examines the impact of two key factors on the dynamic behavior of structures: building height and the stiffness of structural elements. This study focuses on how these factors influence the vibration modes of reinforced concrete buildings, using numerical models assembled in the software ETABS® to simulate buildings with both gross (uncracked) and cracked sections.

As the height of a building increases, its flexibility grows, leading to longer vibration periods. Taller buildings distribute more mass at greater distances from the ground, increasing inertia and the time required to complete an oscillation. In terms of stiffness, cracked sections exhibit lower stiffness to dynamic forces, resulting in longer vibration periods compared to uncracked sections, where the original stiffness remains intact.

The analysis also reveals that, for the structures analyzed in this study, mass participation in the main vibration modes (translational directions X, Y and rotational direction respect to Z) does not significantly vary between gross and cracked sections. This suggests that, despite reduced stiffness in cracked sections, the way mass is mobilized in response to vibrations remains similar. Additionally, while building height affects vibration periods, it does not significantly alter mass participation as long as the structural distribution remains constant.

The study concludes that, for the structures considered, the use of cracked sections reduces stiffness and increase vibration periods, but do not significantly affect mass participation. Regarding height, it increases the building's flexibility, but if the structural design is uniform, mass participation in vibration modes remains constant. These findings are crucial for the seismic design of reinforced concrete buildings, emphasizing the importance of considering the effective stiffness of cracked sections and the dynamic behavior in taller buildings.

Keywords: height, stiffness, reinforced concrete, vibration modes, cracked sections, seismic design.

Introducción

El análisis del comportamiento sísmico de las edificaciones de concreto reforzado es fundamental para garantizar la seguridad estructural en zonas de alta actividad sísmica, como ocurre en diversas regiones de Colombia. Este documento se elabora con el propósito de investigar cómo la altura y la rigidez de las edificaciones de concreto reforzado afectan sus modos de vibración y, en consecuencia, su capacidad de respuesta ante eventos sísmicos. La problemática radica en la necesidad de comprender y optimizar el diseño estructural de estas edificaciones, considerando los parámetros especificados en la normativa colombiana vigente para el diseño y construcción de edificaciones, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, para reducir el riesgo de fallos estructurales durante sismos.

El objetivo principal de este estudio es evaluar el impacto de la altura y la rigidez en los modos de vibración de las estructuras regulares de concreto reforzado mediante la creación de modelos numéricos desarrollados con suficiente grado de precisión. Para alcanzar este objetivo, se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo influye la altura de una edificación en su respuesta dinámica durante un sismo? ¿De qué manera la rigidez estructural, considerando tanto secciones brutas como fisuradas, afecta las frecuencias naturales de vibración? Estas interrogantes guían la investigación hacia la obtención de conclusiones claras que permitan optimizar el diseño sismorresistente de las edificaciones.

La justificación de este estudio radica en la necesidad de mejorar la seguridad y estabilidad de las edificaciones de concreto reforzado en contextos sísmicos, alineándose con los estándares actuales de la normativa colombiana para el diseño de edificaciones. Mediante un análisis detallado y la utilización de herramientas computacionales avanzadas como ETABS®, se busca proporcionar un conocimiento más profundo sobre los factores que influyen en la respuesta sísmica de las estructuras, contribuyendo así a la elaboración de diseños más seguros y eficientes. Este enfoque no solo es relevante para el cumplimiento de las normativas vigentes, sino también para la preservación de vidas y la mitigación de daños materiales en caso de un sismo.

1. Planteamiento del problema

La rigidez y resistencia sísmica de las edificaciones es de vital importancia en regiones como Colombia, donde la actividad sísmica constituye un riesgo constante para las construcciones, las cuales en su mayoría son de concreto reforzado. Estas estructuras enfrentan desafíos significativos en términos de seguridad estructural durante eventos sísmicos. El comportamiento de las edificaciones bajo la acción de un sismo está determinado por diversos factores, siendo la altura y la rigidez de la edificación los más destacados. Sin embargo, la relación precisa entre estos factores y los modos de vibración de las estructuras no se comprende completamente.

El problema central que esta investigación aborda radica en la falta de un entendimiento detallado y cuantificable de cómo la altura y la rigidez de una edificación de concreto reforzado afectan sus frecuencias naturales de vibración, especialmente los modos superiores y, por ende, su respuesta dinámica frente a un sismo. Esta falta de conocimiento específico puede llevar a diseños estructurales que no optimizan adecuadamente la seguridad sismorresistente, poniendo en riesgo tanto las vidas humanas como los bienes materiales.

El interrogante que surge es, ¿Cómo influyen la altura y la rigidez de las edificaciones regulares de concreto reforzado en sus modos de vibración y su capacidad de resistencia frente a eventos sísmicos? Este cuestionamiento impulsa la necesidad de realizar una investigación que proporcione respuestas concretas y basadas en modelos numéricos, permitiendo así una mejor comprensión de estos factores críticos y una aplicación más efectiva de las normativas sismorresistentes, como la NSR-10, en el diseño de edificaciones en altura.

La relevancia de este problema no solo reside en el cumplimiento normativo, sino también en la imperativa necesidad de mejorar la seguridad estructural en áreas urbanas densamente pobladas, donde las consecuencias de un colapso estructural pueden ser catastróficas. Por lo tanto, esta investigación busca generar discusión que ayude a reducir la brecha existente en el conocimiento técnico y proporcionar directrices claras que guíen el diseño y la construcción de edificaciones más seguras y resilientes frente a sismos.

1.1 Antecedentes

Los modos de vibración de una estructura son las formas naturales en las que ésta tiende a oscilar cuando es sometida a una excitación, como un sismo o un viento fuerte. Estas formas de vibración están intrínsecamente ligadas a las propiedades físicas de la estructura, siendo la rigidez, la masa y la altura tres de los factores más influyentes. En la Ilustración 1 se puede apreciar como la altura hace que los periodos de la estructura varíen, aunque se esté aplicando la misma fuerza lateral.

La rigidez de una estructura se refiere a su capacidad para oponerse a las deformaciones bajo la acción de fuerzas externas. Esta propiedad está determinada por los materiales empleados en la construcción y el diseño geométrico de los elementos estructurales. En términos de vibración, una mayor rigidez implica una menor deformación bajo cargas dinámicas, lo que generalmente se traduce en frecuencias naturales más altas. Es decir, estructuras más rígidas tienden a vibrar más rápidamente, presentando modos de vibración con frecuencias mayores (Sánchez et al, 2018)}

Por otro lado, la altura de una estructura influye significativamente en sus modos de vibración debido a la distribución de masa y la geometría. A medida que aumenta la altura, la estructura se vuelve más flexible y susceptible a oscilaciones de baja frecuencia. En edificios altos, los modos de vibración de menor orden (aquellos con frecuencias más bajas) son los más críticos, ya que suelen involucrar desplazamientos mayores y pueden coincidir con las frecuencias de excitación de eventos como terremotos (Gama, 2019)

La interacción entre rigidez y altura es compleja. En estructuras altas, la rigidez debe ser adecuadamente distribuida para controlar las deformaciones y evitar resonancias con las frecuencias de excitación. En la ingeniería estructural se utiliza un análisis modal, que descompone la respuesta dinámica de la estructura en sus modos de vibración naturales, para diseñar edificaciones que puedan soportar las cargas dinámicas de manera eficiente. En resumen, la rigidez y la altura de una estructura son determinantes en sus modos de vibrar. La rigidez afecta directamente las frecuencias naturales de vibración, mientras que la altura influye en la flexibilidad y en los modos de vibración de menor orden. Es por esta razón que se plantea evaluar, mediante un caso ejemplo, el impacto de la altura y rigidez en los modos de vibración de edificaciones regulares de concreto reforzado, considerando secciones brutas y fisuradas, mediante modelos numéricos, con el fin de validar la precisión de algunos parámetros del reglamento NSR-10 en los modelos mencionados con el objetivo de optimizar el diseño sismorresistente.



Ilustración 1 Periodos de vibración péndulos simples (Domínguez, 2014)

La respuesta dinámica de un edificio frente a un terremoto está determinada por cómo se relacionan el período de vibración de las ondas sísmicas y su propio período de vibración. Conocer este valor del período es esencial para anticipar cómo responderá la estructura a los movimientos del terreno durante un sismo. Bajo este contexto se han realizado diversas investigaciones. Por ejemplo, en una investigación realizada por de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle, en la ciudad de Cali, Colombia, se llevaron a cabo simulaciones en una mesa vibradora con modelos a escala reducida variando diversos parámetros, como las masas de los pisos, la rigidez de los elementos estructurales y la altura del edificio, y analizar como estos parámetros influyen en el Período Fundamental de la edificación. Dentro de los resultados más relevantes se encontró que, entre mayor es la altura, el periodo de vibración se incrementa y cuando la rigidez es mayor, el periodo de vibración decrece; además, cuanto mayor es la masa, el periodo de vibración aumenta (Domínguez 2014).

Puesto que el periodo fundamental de vibración de las edificaciones varía según su altura, la norma sismo resistente colombiana establece varias fórmulas para calcular el periodo fundamental aproximado de una estructura. La aplicación de una formula u otra dependerá del sistema estructural que sea usado y la geometría de la estructura NSR-10 (2010). Este tema no es ajeno en la literatura científica, algunos investigadores han proporcionado una evaluación crítica de las fórmulas empíricas utilizadas actualmente para estimar el período fundamental en los códigos de diseño sísmico en Europa (EC8) y Estados Unidos de América (UBC97 y ASCE 7-10), comparando los resultados de dichas formulaciones con análisis dinámicos no lineales más detallados y destacando las limitaciones de las aproximaciones simplificadas de los códigos.

Al investigar específicamente pórticos resistentes a momento de concreto reforzado de altura media, los diferentes parámetros, como la relación longitud-anchura, afectan el período de vibración. Por ejemplo, cuando esta relación aumenta de 1 a 4, el período estimado puede disminuir hasta en un 62%. Además, normalmente, los períodos de construcción estimados en base a ecuaciones simples proporcionadas por códigos de diseño sísmico son significativamente menores que los períodos calculados usando análisis dinámico no lineal. Los resultados del análisis dinámico no lineal se consideran más realistas porque tienen en cuenta el efecto real de la fisuración al estimar la rigidez de las estructuras (Mohamed et al 2019).

La importancia de los modos superiores en el análisis de estructuras es un aspecto crucial que no debe ser subestimado en el diseño y evaluación de edificaciones, especialmente en contextos sísmicos y de viento. Los modos de vibración superiores, aunque generalmente tienen frecuencias más altas y períodos más cortos, pueden influir significativamente en la respuesta dinámica de una estructura, particularmente en edificios altos y estructuras complejas. Este enfoque se basa en una serie de estudios recientes que subrayan la relevancia de considerar estos modos en el análisis estructural.

De los diferentes modos de vibración que tienen las estructuras, el más importante, para el análisis estructural, suele ser el llamado Fundamental por corresponder con las mayores deformaciones y, por lo tanto, con los mayores esfuerzos en sus elementos estructurales. Domínguez (2014). Sin embargo, pueda que sea necesario una representación mejorada de los efectos de modos superiores, que, normalmente, son insuficientemente considerados en procedimientos simples de fuerza horizontal equivalente.

Cuando el análisis multimodal forma la base del diseño sísmico, los efectos de los modos superiores se consideran directamente en el análisis, ya que todos los modos elásticos significativos, en lugar de solo el modo fundamental, se incluyen al determinar las fuerzas de diseño, y los modos superiores llegan, incluso, a tener mayor masa participativa que el modo fundamental (Priestley 2003). (Terán, 2006) explica en su investigación que la degradación de rigidez puede implicar que la contribución del modo fundamental de vibrar a la respuesta dinámica de la estructura disminuya, mientras que la contribución de los modos superiores puede ocasionar incrementos de los desplazamientos y fuerzas laterales en los pisos superiores.

En el diseño de edificios altos, los modos superiores son cruciales para garantizar la seguridad y el desempeño de la estructura bajo cargas laterales. Hamzah et al. (2018) investigaron la respuesta dinámica de torres de transmisión y encontraron que los modos superiores influyen significativamente en la distribución de esfuerzos y deformaciones a lo largo de la estructura. En edificios altos, donde las fuerzas laterales pueden inducir vibraciones resonantes, los modos superiores deben ser considerados para evitar resonancias que puedan comprometer la integridad estructural.

En el contexto de la ingeniería sísmica, la influencia de los modos superiores es particularmente significativa. (Georgoussis y Mamou, 2019) analizaron cómo la excentricidad de masa en edificios puede llevar a una respuesta torsional amplificada, un fenómeno donde los modos superiores juegan un rol clave. Este estudio destaca que la interacción entre los modos torsionales y los modos de traslación puede amplificar las respuestas estructurales, llevando a mayores desplazamientos y daños potenciales durante un sismo.

Adicionalmente, un estudio de (Hur et al, 2017) sobre la evaluación sísmica de componentes no estructurales muestra que los modos superiores influyen en la respuesta de estos elementos. Los componentes no estructurales, como equipos mecánicos y eléctricos, pueden experimentar amplificaciones significativas debido a los modos de vibración superiores, lo que puede comprometer su funcionalidad y seguridad durante un terremoto, provocando que, aunque la estructura que comprende el sistema de resistencia sísmica no se dañe significativamente, los elementos no estructurales puedan colapsar y provocar pérdidas humanas y/o materiales.

Para capturar la influencia de los modos superiores, se utilizan métodos como el análisis modal y espectral detallado. Esta técnica permite descomponer la respuesta dinámica de una estructura en sus componentes modal, proporcionando una imagen clara de cómo los modos superiores contribuyen al comportamiento global. El uso de análisis espectral y modal avanzado es esencial para diseñar estructuras que puedan resistir de manera efectiva las cargas dinámicas, ya que estos métodos capturan la interacción compleja entre múltiples modos de vibración (Goel y Chopra, 1993).

Estas investigaciones subrayan la importancia de considerar la rigidez en el diseño y análisis de estructuras para mejorar su rendimiento y seguridad frente a diversas cargas, tanto estáticas como dinámicas. La rigidez adecuada no solo garantiza que las deformaciones se mantengan dentro de límites aceptables durante eventos sísmicos o vientos fuertes; una estructura bien diseñada con una distribución uniforme de la rigidez puede prevenir fallos catastróficos al disipar de manera eficiente las energías dinámicas, asegurando así la integridad y funcionalidad de la edificación en condiciones extremas.

En conclusión, la importancia de los modos superiores en el análisis estructural radica en su capacidad para capturar la respuesta dinámica completa de una edificación. Los estudios antes mencionados han demostrado que ignorar estos modos puede llevar a subestimaciones significativas de desplazamientos y esfuerzos, lo que puede comprometer la seguridad y funcionalidad de la estructura durante eventos dinámicos como sismos. Los modos superiores son particularmente relevantes en edificios altos y estructuras con irregularidades, donde su influencia en la respuesta torsional y la distribución de esfuerzos es crítica. Para abordar estos desafíos, el uso de técnicas avanzadas de análisis modal y espectral es indispensable, permitiendo a la ingeniería estructural diseñar edificaciones que sean no solo eficientes, sino también seguras y resilientes ante cargas dinámicas.

2. Justificación

El estudio de los efectos de la altura y la rigidez en los modos de vibración de las edificaciones de concreto reforzado es esencial para mejorar la comprensión del comportamiento sísmico de estas estructuras. En un contexto como el colombiano, donde la actividad sísmica es una amenaza constante, el diseño y construcción de edificaciones que puedan resistir sismos de manera efectiva es una prioridad. El motivo de esta investigación radica en la necesidad de ayudar a llenar un vacío en el conocimiento actual sobre cómo la altura y la rigidez interactúan para influir en la respuesta dinámica de las estructuras regulares de concreto reforzado durante un sismo.

La selección de este tema se justifica por varias razones. Primero, aunque existen normas y estándares como la NSR-10 que guían el diseño sismorresistente en Colombia, no siempre se dispone de estudios específicos que aborden de manera detallada las particularidades de las estructuras de concreto reforzado en función de su altura y rigidez. Este estudio busca proporcionar datos concretos y modelos que permitan a ingenieros y diseñadores estructurales mejorar sus enfoques de diseño. Aunque no pretende generar cambios directos en las normativas existentes, los resultados obtenidos pueden contribuir a un mejor entendimiento de cómo optimizar la seguridad intrínseca de las edificaciones, asegurando que estas cumplan con los estándares actuales de manera más eficaz.

Al comprender mejor la relación entre altura, rigidez y modos de vibración, se podrá contribuir al desarrollo de metodologías de diseño estructural más eficaces que integren estos factores, lo cual ayudaría a reducir el riesgo de colapso estructural en situaciones de sismo. Aunque este estudio no pretende establecer nuevas normas, sí puede ofrecer información valiosa que beneficie a la comunidad científica y académica, y que tenga aplicaciones prácticas en la ingeniería civil. De esta manera, se espera mejorar la seguridad y resiliencia de las infraestructuras urbanas en Colombia y en otras regiones con alta actividad sísmica

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar con un caso ejemplo el impacto de la altura y rigidez en los modos de vibración de edificaciones regulares de concreto reforzado, considerando secciones brutas y fisuradas, mediante modelos numéricos, con el fin de validar la precisión de algunos parámetros del reglamento NSR-10 y optimizar el diseño sismorresistente.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar búsqueda bibliográfica basada en el tema.
- Definir los casos de modelación a estudiar.
- Realizar modelos computacionales utilizando el programa ETABS.
- Realizar informe de resultados obtenidos y concluir.

4. Hipótesis

El comportamiento dinámico de las edificaciones de concreto reforzado se ve significativamente afectado por la altura y el estado de fisuración de sus secciones estructurales.

Se plantea que:

- La altura de una edificación incrementa su flexibilidad, lo que aumenta el período de vibración de la estructura, haciendo que responda más lentamente a las fuerzas dinámicas como las generadas por sismos. Este aumento en el período es proporcional a la altura del edificio, independientemente de si las secciones son brutas o fisuradas.
- Las secciones fisuradas disminuyen la rigidez estructural en comparación con las secciones brutas, lo que también incrementa el período de vibración de la edificación. Sin embargo, la participación de masa en los principales modos de vibración se mantendrá constante en ambos casos, ya que la distribución estructural global no cambia.

Por lo tanto, se espera que el incremento en altura y la fisuración de las secciones tengan un efecto considerable en la flexibilidad y el período de vibración, pero no afecten significativamente la distribución de la masa participativa en los modos principales de vibración. Esto permitirá mantener un comportamiento dinámico predecible, siempre que la distribución estructural sea uniforme.

5. Marco teórico

Altura y Modos de Vibración

La altura de una edificación es un factor crítico en su comportamiento sísmico. A medida que la altura aumenta, la estructura se vuelve más flexible, lo que generalmente se traduce en un aumento de los períodos naturales de vibración. Los modos de vibración de una estructura son las formas en que esta tiende a oscilar bajo la influencia de fuerzas dinámicas, como las producidas por un sismo. En edificios más altos, los modos de vibración superiores empiezan a ser predominantes y suelen estar asociados con participaciones de masa mayores. Esto hace que la altura sea un factor determinante en la planificación y diseño sismorresistente, ya que una inadecuada consideración de los modos de vibración puede llevar a diseños deficientes que comprometan la estabilidad estructural.

El período fundamental de una estructura es el tiempo que tarda en completar un ciclo completo de vibración bajo la influencia de una carga dinámica, como un sismo. Es una característica intrínseca de la estructura que depende de su masa y rigidez. Una estructura con un período fundamental más largo será más flexible, mientras que una con un período más corto será más rígida Chopra (2017).

Los modos de vibración son las diferentes formas en que una estructura puede oscilar cuando es excitada por fuerzas externas, como las ondas sísmicas. Cada modo de vibración está asociado con una frecuencia específica y una forma modal que describe el patrón de desplazamiento de la estructura en ese modo particular Chopra (2017).

Rigidez estructural

La rigidez de una estructura se refiere a su capacidad para oponerse a las deformaciones bajo cargas aplicadas, y es un factor crítico en la respuesta dinámica de las edificaciones de concreto reforzado. En este tipo de estructuras, la rigidez está influenciada principalmente por las propiedades de los materiales utilizados, la geometría de los elementos estructurales⁵ y el estado de fisuración del concreto.

La rigidez de secciones brutas se refiere a la rigidez calculada bajo la suposición de que el concreto no presenta fisuración, es decir, se considera que la sección completa contribuye a la rigidez de la estructura. Este enfoque es útil en las etapas iniciales del diseño estructural, donde se

busca evaluar la capacidad total de la estructura para resistir cargas sin considerar las fisuras que pueden desarrollarse bajo carga. Según Mohamed, El Kashif, y Salem (2019), las secciones brutas tienden a sobreestimar la rigidez de la estructura, lo que puede llevar a una subestimación del período fundamental y a una interpretación errónea de la respuesta dinámica de la edificación.

Por otro lado, la rigidez de secciones fisuradas toma en cuenta las fisuras que inevitablemente se desarrollan en el concreto bajo cargas de servicio y últimas, lo que reduce la rigidez efectiva de la estructura. En el reglamento de diseño sismorresistente colombiano (NSR-10) se establece que para trabajar con secciones fisuradas unas de las opciones es disminuir la rigidez de todos los elementos a un 50%. Esta condición refleja un comportamiento más realista del concreto reforzado en condiciones de operación y de resistencia última, ya que las fisuras disminuyen la capacidad de los elementos estructurales para oponerse a las deformaciones. Como señalan Sánchez y Vargas (2018), considerar la rigidez de secciones fisuradas es crucial para una evaluación precisa de las frecuencias naturales de vibración y el comportamiento dinámico global de la estructura, especialmente en el diseño sismorresistente.

Modelación Numérica

La modelación numérica se ha convertido en una herramienta indispensable para el análisis estructural, permitiendo a los ingenieros evaluar el comportamiento de las edificaciones bajo diferentes condiciones de carga. El programa ETABS® es una de las herramientas más utilizadas en este ámbito debido a su capacidad para modelar y analizar estructuras complejas de manera precisa. En el contexto de esta monografía, se emplearán modelos numéricos en ETABS® para analizar edificaciones de 5, 10, 15 y 20 pisos con alturas de entre piso de 3.00 m. Para cada edificación, se desarrollarán dos modelos: uno considerando secciones brutas y otro considerando secciones fisuradas. Este enfoque permitirá evaluar cómo varían los modos de vibración y las frecuencias naturales de las estructuras en función de la altura y del estado de fisuración.

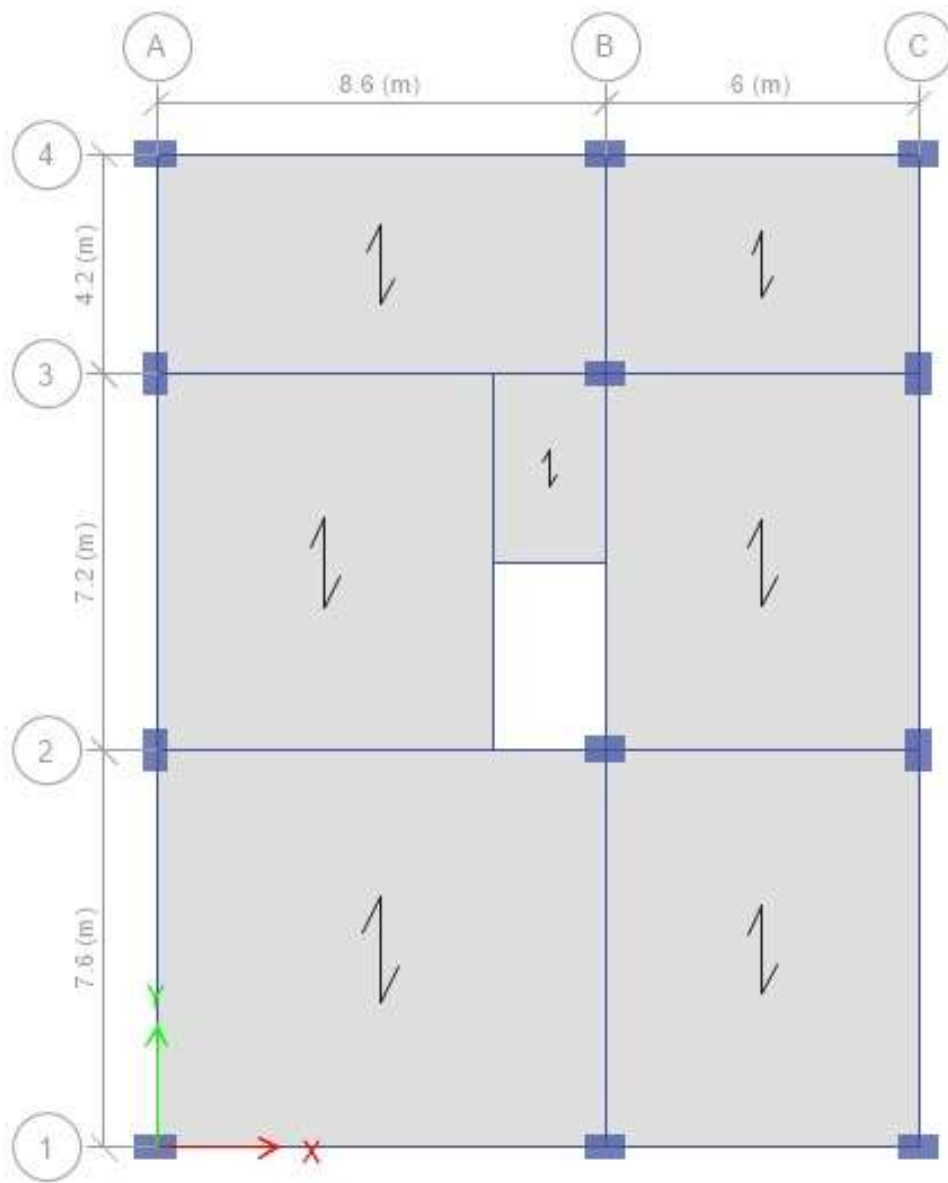


Ilustración 2. Planta típica de la estructura

6. Metodología

La metodología de este estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, dado que busca analizar de manera precisa y objetiva cómo la altura y la rigidez de las edificaciones regulares de concreto reforzado influyen en sus modos de vibración y, por ende, en su comportamiento sísmico. Este enfoque permite la recolección de datos numéricos a través de modelos computacionales y su posterior análisis estadístico, lo que facilita la obtención de conclusiones basadas en evidencia empírica.

Para llevar a cabo esta investigación, se utilizaron modelos numéricos desarrollados con el software ETABS®, ampliamente reconocido en el campo de la ingeniería estructural. Este programa permite simular el comportamiento dinámico de las edificaciones bajo cargas sísmicas, tomando en cuenta diversas variables como la altura, la rigidez, y la condición de fisuración de las secciones de concreto. Se realizaron simulaciones tanto para secciones brutas como para secciones fisuradas, lo que permitió evaluar de manera integral cómo estos factores afectan las frecuencias naturales de vibración de las estructuras.

La metodología también incluyó la validación de los resultados obtenidos mediante la comparación con los parámetros y directrices establecidos en la norma NSR-10, la cual regula el diseño sismorresistente en Colombia. Este proceso de validación asegura que los hallazgos del estudio sean aplicables y relevantes para el contexto normativo y práctico de la ingeniería civil en el país.

En resumen, la investigación sigue un enfoque cuantitativo riguroso, apoyado en la modelación computacional y el análisis de datos, lo que permite obtener resultados precisos y confiables sobre la influencia de la altura y la rigidez en la respuesta sísmica de las edificaciones de concreto reforzado.

6.1 Descripción de las edificaciones y parámetros sísmicos del caso de estudio

Datos iniciales

- **Ubicación:** Medellín – Colombia
- **Tipo de suelo:** D
- **Sistema estructura:** Pórticos resistente a momentos

características geométricas y de resistencias

Tabla 1. Geometría y resistencia de los elementos

# NIVELES	ELEMENTOS	SECCIÓN [cm]	f'c [MPa]
5	VIGAS PRINCIPALES	40X60	28
	VIGAS SECUNDARIAS	30X60	28
	COLUMNAS TIPO 1	50X80	35
10	VIGAS PRINCIPALES	40X60	35
	VIGAS SECUNDARIAS	30X60	35
	COLUMNAS TIPO 1	50X80	35
	COLUMNAS TIPO 2	50X100	35
15	VIGAS PRINCIPALES	50X70	35
	VIGAS SECUNDARIAS	30X60	35
	COLUMNAS TIPO 3	70X120	42
20	VIGAS PRINCIPALES	50X70	35
	VIGAS SECUNDARIAS	30X60	35
	COLUMNAS TIPO 3	70X120	42

Las vigas secundarias en cada nivel solo están en la zona de escalera (2 elementos).

Detalle de planta típica

En la Ilustración 2 podemos observar la planta típica que se usó para la modelación de la estructura, esta planta consta de:

- La planta está organizada en tres ejes alfabéticos (A, B, C) y cuatro ejes numéricos (1, 2, 3, 4), los ejes alfabéticos están orientados en dirección (Y) y los ejes numéricos en dirección (X)
- Los ejes alfabéticos están espaciados a 8.6 m (entre A y B) y 6 m (entre B y C).
- Los ejes numéricos tienen diferentes distancias: entre 1 y 2 hay 7.60 m, entre 2 y 3 hay 7.20 m, y entre 3 y 4 hay 4.2 m.

Con esta misma planta estructural se modelaron cuatro edificaciones, cada una con diferentes alturas. El primero será una estructura de 5 niveles, el segundo de 10 niveles, el tercero

de 15 niveles, y el cuarto alcanzará los 20 niveles. Todas las estructuras tendrán una altura de entrepiso de 3 metros, lo que significa que la estructura más baja tendrá una altura total de 15 metros, mientras que la más alta alcanzará los 60 metros. Cada una mantendrá la misma ubicación de columnas y ejes, asegurando la repetitividad en planta.

Vista en corte de modelos:

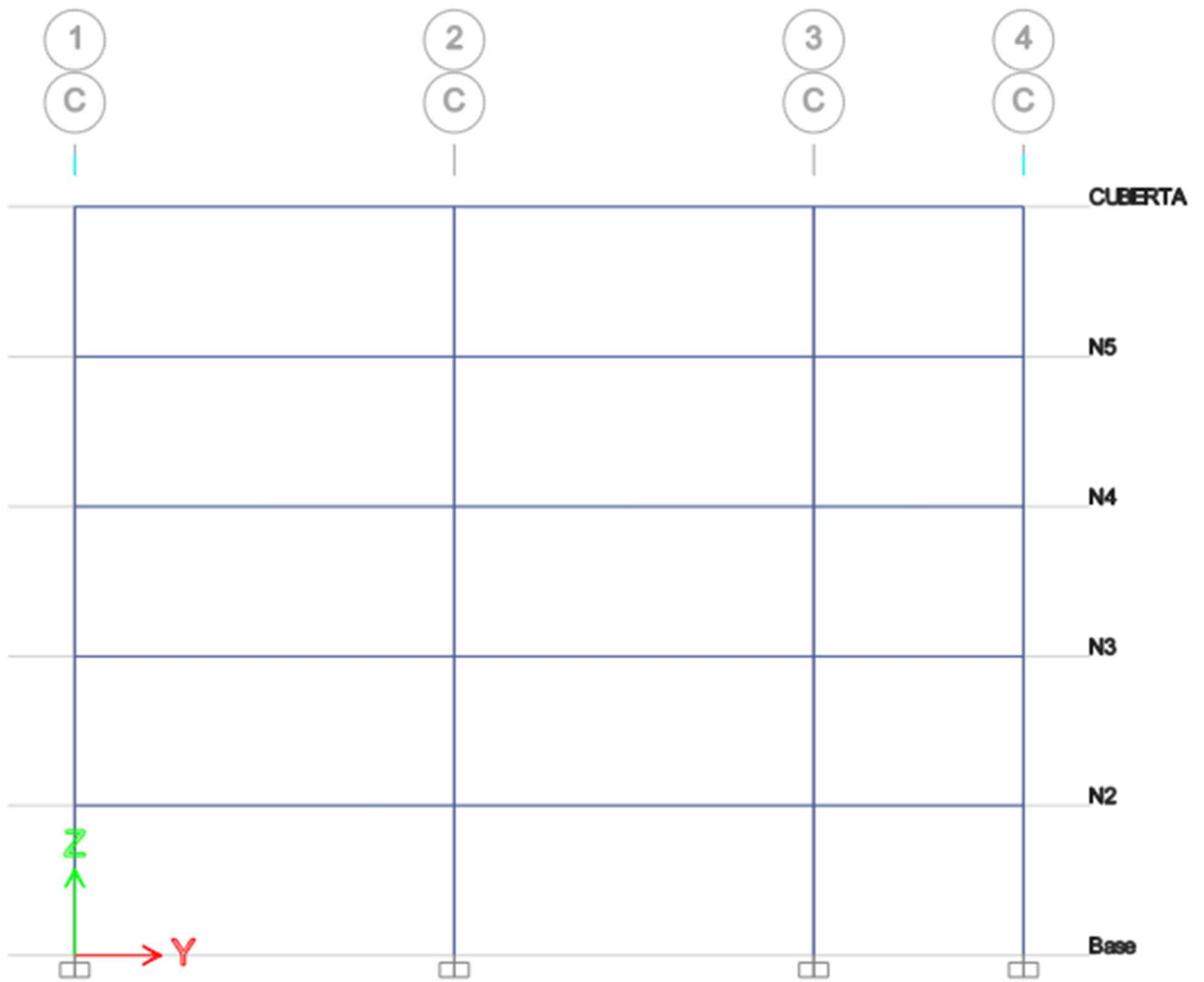


Ilustración 3. Vista corte C-C 5 niveles

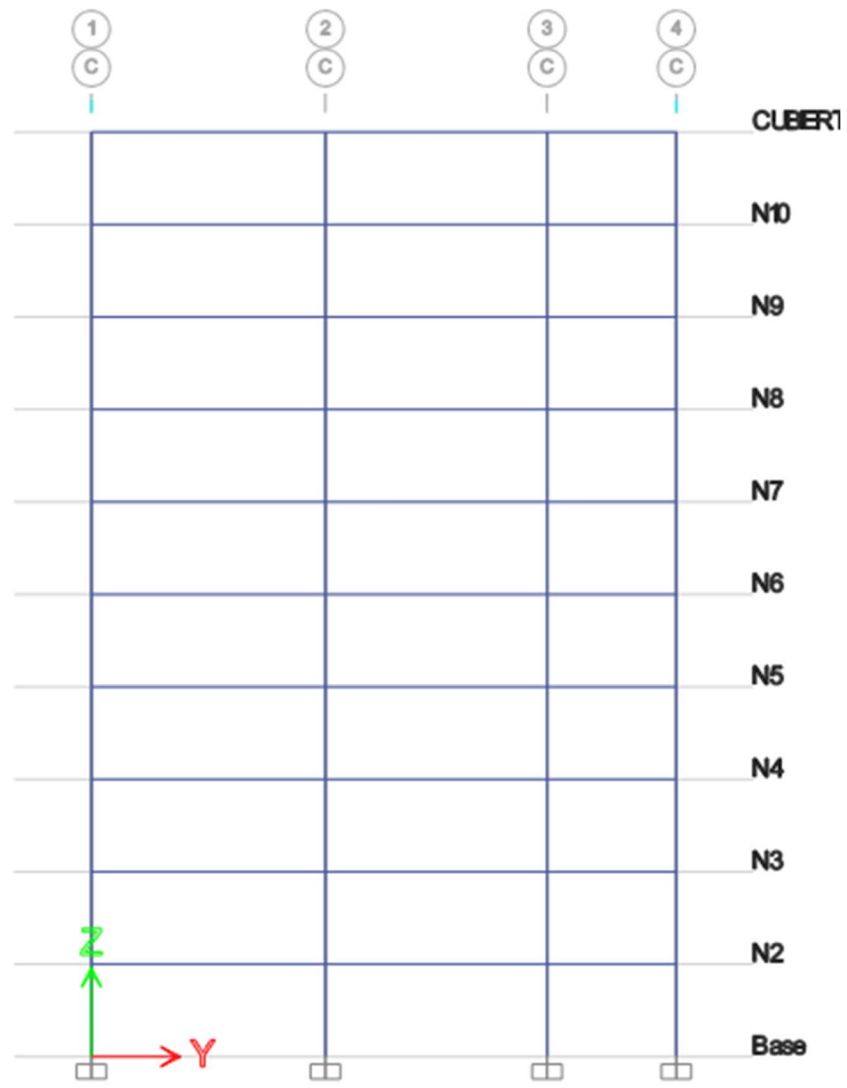


Ilustración 4. Vista corte C-C 10 niveles

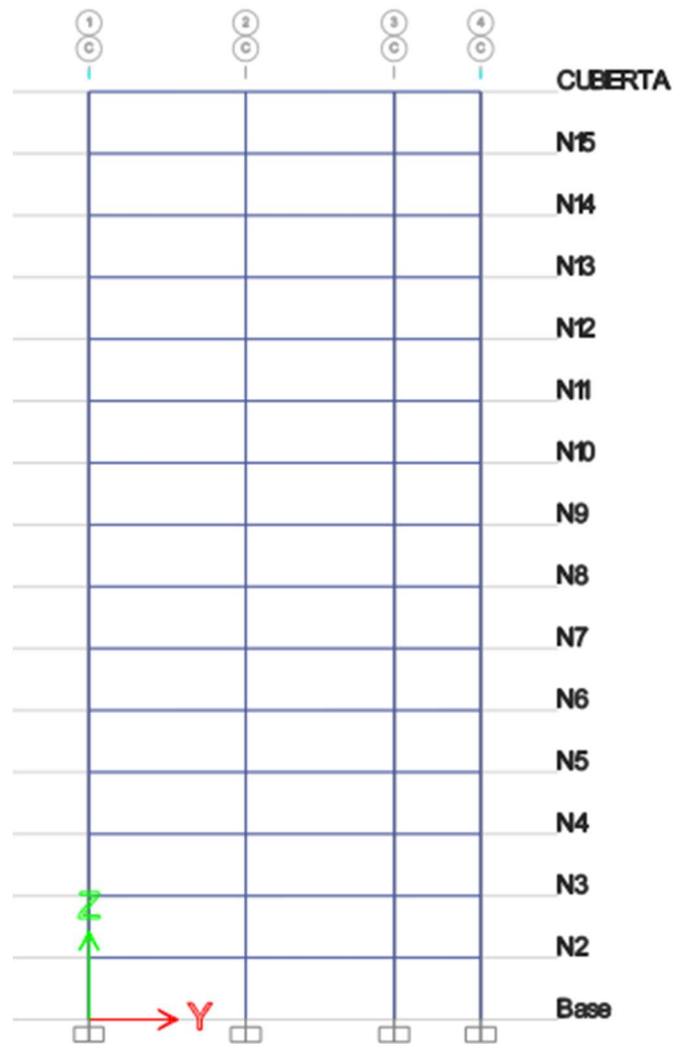


Ilustración 5. Vista corte C-C 15 niveles



Ilustración 6. Vista corte C-C 20 niveles

Parámetros sísmicos

- **A_a** coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño.
- **A_v** coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño.
- **F_a** coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio, adimensional.
- **F_v** coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio, adimensional.

Tabla 2. Parámetros sísmicos

DATOS DE USO		ÍTEM	VALOR
CIUDAD	MEDELLÍN	Aa	0.15
SUELO	TIPO D	Av	0.20
USO	GRUPO 1	Fa	1.50
I	1.00	Fv	2.00

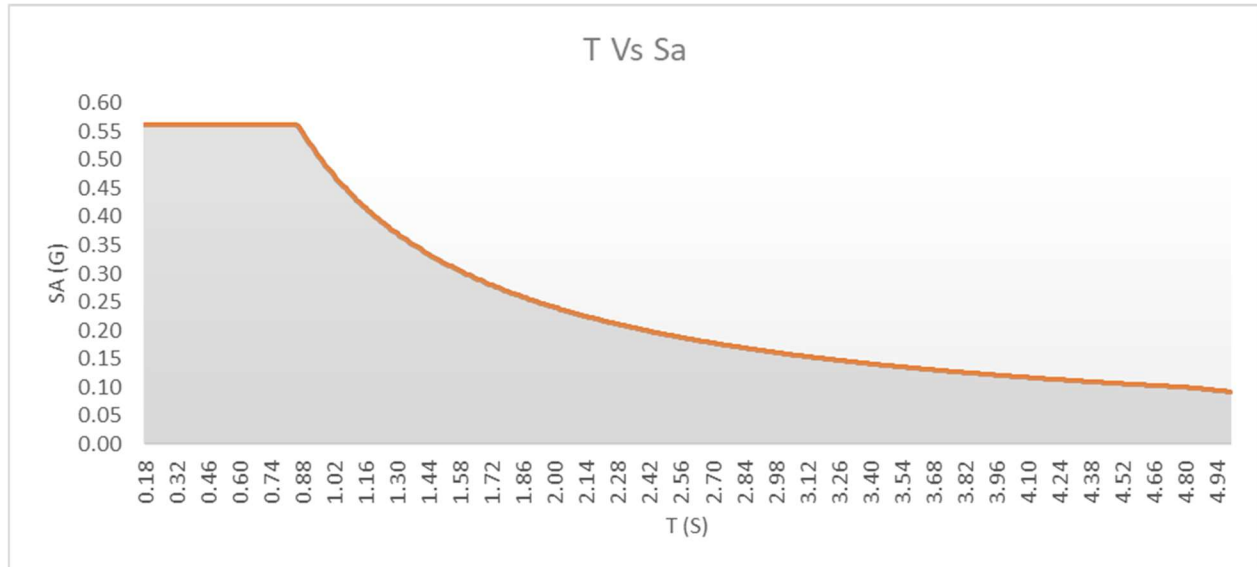


Tabla 3. Espectro de aceleración Medellín – suelo tipo D

7. Resultados

7.1 Ajuste del cortante en la base

El ajuste del cortante en la base se realiza para asegurarse de que los resultados del análisis modal (dinámico) sean consistentes con los resultados obtenidos del análisis estático, en términos del cortante basal. Este ajuste suele asociarse a requisitos normativos y es crucial para garantizar que las fuerzas sísmicas utilizadas en el análisis dinámico no sean excesivamente bajas y que la estructura esté diseñada para resistir adecuadamente los efectos sísmicos. Esto, bajo un enfoque de diseño sismorresistente basado en fuerzas, donde se cree que, entre más fuerza sísmica se utilice, más segura es la estructura diseñada.

La NSR-10 requiere que, para estructuras regulares, el cortante basal obtenido del análisis dinámico no sea menor al 80% que el obtenido por el análisis estático. Si el análisis modal arroja un cortante basal menor que el del análisis estático, debe ajustarse para cumplir con las normativas. A continuación, se presentan los resultados de ajustes de cortante basal dinámica para las estructuras estudiadas. Se aclara que, cuando el factor de ajuste es menor que la unidad, se toma como factor ajuste la unidad; es decir, se mantiene el mismo nivel de cortante basal dinámica.

Tabla 4. Ajuste del cortante en la base para estructura de 5 niveles sin fisurar y fisurada

5 Niveles no fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX	FY
		kN	kN
FHEX	LinStatic	8312.82	0
FHEY	LinStatic	0	8312.82
Sismo X	LinRespSpec	6536.23	263.49
Sismo Y	LinRespSpec	263.49	6700.35
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1.017	80%
Sismo X AJUSTADO		6650.26	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	81%
Sismo Y AJUSTADO		6700.35	

5 Niveles fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX	FY
		kN	kN
FHEX	LinStatic	8387.34	0
FHEY	LinStatic	0	8387.34
Sismo X	LinRespSpec	6556.72	235.95
Sismo Y	LinRespSpec	235.95	6790.88
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1.023	80%
Sismo X AJUSTADO		6709.87	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	81%
Sismo Y AJUSTADO		6790.88	

Tabla 5. Ajuste del cortante en la base para estructura de 10 niveles sin fisurar y fisurada

10 Niveles no fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX kN	FY kN
FHEX	LinStatic	12051.41	0
FHEY	LinStatic	0	12692.57
Sismo X	LinRespSpec	9474.48	376.65
Sismo Y	LinRespSpec	376.65	10209.85
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1.018	80%
Sismo X AJUSTADO		9641.13	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	80%
Sismo Y AJUSTADO		10209.85	

10 Niveles fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX kN	FY kN
FHEX	LinStatic	11290.94	0
FHEY	LinStatic	0	11290.94
Sismo X	LinRespSpec	7027.79	273.52
Sismo Y	LinRespSpec	273.52	7567.63
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1.285	80%
Sismo X AJUSTADO		9032.75	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1.194	80%
Sismo Y AJUSTADO		9032.75	

Tabla 6. Ajuste del cortante en la base para estructura de 15 niveles sin fisurar y fisurada

15 Niveles no fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX kN	FY kN
FHEX	LinStatic	17851.38	0
FHEY	LinStatic	0	17851.38
Sismo X	LinRespSpec	15137.66	415.56
Sismo Y	LinRespSpec	415.56	16318.08
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1	85%
Sismo X AJUSTADO		15137.66	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	91%
Sismo Y AJUSTADO		16318.08	

15 Niveles fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX kN	FY kN
FHEX	LinStatic	14119.61	0
FHEY	LinStatic	0	15297.81
Sismo X	LinRespSpec	11410.52	301.76
Sismo Y	LinRespSpec	301.76	12381.57
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1	81%
Sismo X AJUSTADO		11410.52	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	81%
Sismo Y AJUSTADO		12381.57	

Tabla 7. Ajuste del cortante en la base para estructura de 20 niveles sin fisurar y fisurada

20 Niveles no fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX kN	FY kN
FHEX	LinStatic	18224.61	0
FHEY	LinStatic	0	18322.18
Sismo X	LinRespSpec	14741.43	356.66
Sismo Y	LinRespSpec	356.66	15911.89
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1	81%
Sismo X AJUSTADO		14741.43	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	87%
Sismo Y AJUSTADO		15911.89	

20 Niveles fisurado			
TIPO DE ESTRUCTURA		REGULAR	
FACTOR DE AJUSTE		0.8	
FACTOR DE AJUSTE INV		1.25	
Output Case	Case Type	FX kN	FY kN
FHEX	LinStatic	14392.33	0
FHEY	LinStatic	0	14764.9
Sismo X	LinRespSpec	11442.57	290.27
Sismo Y	LinRespSpec	290.27	12510.11
AJUSTE DEL CORTANTE EN LA BASE			
FACTOR DE AJUSTE EN X		1.006	80%
Sismo X AJUSTADO		11513.86	
FACTOR DE AJUSTE EN Y		1	85%
Sismo Y AJUSTADO		12510.11	

7.2 Análisis modal

Las siguientes tablas muestran la masa modal participativa para las estructuras de 5, 10, 15 y 20 niveles, con secciones brutas y secciones fisuradas. Estos coeficientes indican qué porcentaje de la masa de la estructura participa en cada modo de vibración y en cada dirección (UX, UY, RZ). Además, se presenta la suma acumulada de la masa participativa para cada dirección, lo cual es esencial para verificar que la masa total participativa en modos utilizados capture al menos el 90% en las direcciones horizontales, según lo requerido por las normativas sismo-resistentes.

Tabla 9. Análisis modal para estructura de 10 niveles sin fisurar y fisurada

TABLE 2: Modal Participating Mass Ratios (10 Niveles)									
Modo	Dirección	Period sec sin fisurar	Period sec fisurado	UX sin fisurar	UX fisurado	UY sin fisurar	UY fisurado	RZ sin fisurar	RZ fisurado
Modo 1	x	1.193	1.646	77.00%	77.00%	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%
Modo 2	y	1.134	1.554	0.00%	0.00%	79.00%	79.00%	1.00%	1.00%
Modo 3	z	0.952	1.318	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	77.00%	77.00%
Modo 4	x	0.370	0.513	10.00%	10.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 5	y	0.361	0.497	0.00%	0.00%	11.00%	10.00%	0.00%	0.00%
Modo 6	z	0.299	0.414	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.00%	10.00%
Modo 7	x	0.196	0.274	4.00%	4.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 8	y	0.200	0.277	0.00%	0.00%	4.00%	4.00%	0.00%	0.00%
Modo 9	z	0.161	0.224	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.00%	4.00%
Modo 10	x	0.123	0.172	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 11	y	0.132	0.183	0.00%	0.00%	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%
Modo 12	z	0.102	0.142	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.00%	2.00%
Modo 13	x	0.084	0.117	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 14	y	0.094	0.131	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%	0.00%	0.00%
Modo 15	z	0.071	0.098	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%

Modo	Dirección	SumUX sin fisurar	SumUX fisurado	SumUY sin fisurar	SumUY fisurado	SumRZ sin fisurar	SumRZ fisurado
Modo 1	x	77.00%	77.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%
Modo 2	y	77.00%	77.00%	79.00%	79.00%	79.00%	2.00%
Modo 3	z	78.00%	79.00%	80.00%	80.00%	80.00%	79.00%
Modo 4	x	89.00%	89.00%	80.00%	80.00%	80.00%	79.00%
Modo 5	y	93.00%	89.00%	90.00%	90.00%	90.00%	79.00%
Modo 6	z	93.00%	89.00%	90.00%	90.00%	90.00%	89.00%
Modo 7	x	96.00%	93.00%	94.00%	94.00%	94.00%	89.00%
Modo 8	y	93.00%	89.00%	94.00%	94.00%	94.00%	89.00%
Modo 9	z	96.00%	93.00%	94.00%	94.00%	94.00%	93.00%
Modo 10	x	97.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%	94.00%
Modo 11	y	96.00%	93.00%	96.00%	96.00%	96.00%	93.00%
Modo 12	z	97.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%
Modo 13	x	0.00%	97.00%	98.00%	98.00%	98.00%	96.00%
Modo 14	y	0.00%	96.00%	98.00%	98.00%	98.00%	96.00%
Modo 15	z	0.00%	97.00%	99.00%	99.00%	99.00%	97.00%

Tabla 10. Análisis modal para estructura de 15 niveles sin fisurar y fisurada

TABLE 3: Modal Participating Mass Ratios (15 Niveles)									
Modo	Dirección	Period sec		UX		UY		RZ	
		sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado
Modo 1	x	1.342	1.822	76.00%	77.00%	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%
Modo 2	y	1.247	1.678	0.00%	0.00%	77.00%	77.00%	0.00%	1.00%
Modo 3	z	1.046	1.422	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	77.00%	77.00%
Modo 4	x	0.417	0.571	11.00%	10.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 5	y	0.393	0.533	0.00%	0.00%	11.00%	11.00%	0.00%	0.00%
Modo 6	z	0.331	0.452	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.00%	10.00%
Modo 7	x	0.222	0.308	4.00%	4.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 8	y	0.213	0.293	0.00%	0.00%	4.00%	4.00%	0.00%	0.00%
Modo 9	z	0.181	0.249	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.00%	4.00%
Modo 10	x	0.142	0.197	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 11	y	0.140	0.194	0.00%	0.00%	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%
Modo 12	z	0.117	0.161	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.00%	2.00%
Modo 13	x	0.098	0.136	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 14	y	0.100	0.138	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%	0.00%	0.00%
Modo 15	z	0.082	0.113	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%

Modo	Dirección	SumUX		SumUY		SumRZ	
		sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado
Modo 1	x	76.00%	77.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%
Modo 2	y	76.00%	77.00%	77.00%	78.00%	77.00%	1.00%
Modo 3	z	77.00%	77.00%	77.00%	78.00%	77.00%	78.00%
Modo 4	x	92.00%	88.00%	77.00%	78.00%	77.00%	78.00%
Modo 5	y	92.00%	88.00%	89.00%	89.00%	89.00%	79.00%
Modo 6	z	92.00%	88.00%	89.00%	89.00%	89.00%	88.00%
Modo 7	x	94.00%	92.00%	89.00%	89.00%	89.00%	88.00%
Modo 8	y	94.00%	92.00%	93.00%	93.00%	93.00%	88.00%
Modo 9	z	95.00%	92.00%	93.00%	93.00%	93.00%	92.00%
Modo 10	x	96.00%	94.00%	93.00%	93.00%	93.00%	92.00%
Modo 11	y	95.00%	94.00%	95.00%	95.00%	95.00%	92.00%
Modo 12	z	96.00%	94.00%	95.00%	95.00%	95.00%	95.00%
Modo 13	x	0.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%	95.00%
Modo 14	y	0.00%	94.00%	96.00%	96.00%	96.00%	95.00%
Modo 15	z	0.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%

Tabla 11. Análisis modal para estructura de 20 niveles sin fisurar y fisurada

TABLE 4: Modal Participating Mass Ratios (20 Niveles)									
Modo	Dirección	Period sec		UX		UY		RZ	
		sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado
Modo 1	x	1.883	2.522	76.00%	77.00%	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%
Modo 2	y	1.740	2.318	0.00%	0.00%	76.00%	77.00%	0.00%	0.00%
Modo 3	z	1.429	1.943	1.00%	1.00%	0.00%	1.00%	77.00%	77.00%
Modo 4	x	0.590	0.802	12.00%	11.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 5	y	0.549	0.741	0.00%	0.00%	12.00%	11.00%	0.00%	0.00%
Modo 6	z	0.459	0.626	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	10.00%	10.00%
Modo 7	x	0.319	0.441	4.00%	4.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 8	y	0.300	0.411	0.00%	0.00%	4.00%	4.00%	0.00%	0.00%
Modo 9	z	0.257	0.352	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.00%	4.00%
Modo 10	x	0.210	0.291	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 11	y	0.202	0.278	0.00%	0.00%	2.00%	2.00%	0.00%	0.00%
Modo 12	z	0.171	0.235	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.00%	2.00%
Modo 13	x	0.149	0.207	1.00%	1.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Modo 14	y	0.147	0.203	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%	0.00%	0.00%
Modo 15	z	0.123	0.17	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%	1.00%

Modo	Dirección	SumUX		SumUY		SumRZ	
		sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado	sin fisurar	fisurado
Modo 1	x	76.00%	77.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.00%
Modo 2	y	76.00%	77.00%	76.00%	77.00%	76.00%	1.00%
Modo 3	z	76.00%	77.00%	77.00%	78.00%	77.00%	79.00%
Modo 4	x	92.00%	88.00%	77.00%	78.00%	77.00%	79.00%
Modo 5	y	92.00%	88.00%	89.00%	89.00%	89.00%	79.00%
Modo 6	z	92.00%	88.00%	89.00%	89.00%	89.00%	88.00%
Modo 7	x	94.00%	92.00%	89.00%	89.00%	89.00%	88.00%
Modo 8	y	94.00%	92.00%	92.00%	93.00%	92.00%	89.00%
Modo 9	z	94.00%	92.00%	92.00%	93.00%	92.00%	92.00%
Modo 10	x	95.00%	94.00%	92.00%	93.00%	92.00%	92.00%
Modo 11	y	96.00%	94.00%	95.00%	95.00%	95.00%	92.00%
Modo 12	z	96.00%	94.00%	95.00%	95.00%	95.00%	94.00%
Modo 13	x	0.00%	95.00%	95.00%	95.00%	95.00%	94.00%
Modo 14	y	0.00%	95.00%	96.00%	96.00%	96.00%	94.00%
Modo 15	z	0.00%	95.00%	96.00%	96.00%	96.00%	96.00%

8. Discusión

8.1 Análisis del ajuste del cortante en la base.

8.1.1 Secciones brutas vs fisuradas

A pesar de que las secciones fisuradas pueden aumentar la masa (debido a la necesidad de utilizar mayores secciones de elementos para controlar las derivas de piso), y se esperaría que esto aumente la cortante en la base de la estructura, la influencia en la respuesta sísmica está más relacionada con los cambios en rigidez que en la masa. Las secciones fisuradas tienen menor rigidez efectiva que las secciones brutas, lo que incrementa los periodos de vibración de la estructura. Un periodo de vibración más largo implica una respuesta sísmica menor, ya que las aceleraciones espectrales tienden a ser menores para periodos largos en el espectro de diseño, consecuentemente, la fuerza sísmica disminuye. Por esta razón las estructuras modeladas con secciones fisuradas dieron como resultados una cortante en la base menor comparadas con las cortantes en la base de las secciones brutas.

8.1.2 Misma sección vs Altura

A medida que se incrementa la altura de la estructura el ajuste del cortante en la base se va haciendo menos necesario esto pasa por razones similares a las del punto anterior, estructuras más altas tienen periodos de vibración más largos, lo que reduce la aceleración espectral (S_a) y, por lo tanto, la demanda sísmica total. Debido a esto, en estructuras altas con periodos largos, es menos probable que el cortante basal se vea subestimado, y por lo tanto, la norma no requiere realizar ajustes adicionales en estas estructuras, ya que el espectro refleja adecuadamente las menores demandas sísmicas para estas condiciones.

8.2 Análisis modal

8.2.1 Secciones brutas vs Secciones fisuradas

- Periodo de vibración

Los edificios sin fisurar presentan períodos de vibración menores en comparación con los edificios fisurados, lo que es lógico ya que las secciones sin fisuras son más rígidas.

En los análisis con secciones sin fisurar las secciones de los elementos estructurales, como vigas y columnas, mantienen su rigidez original. Esto implica edificios más rígidos en comparación con su contraparte fisurada, lo que resulta en un período de vibración más corto. Es decir, la estructura responde más rápidamente a las solicitaciones sísmicas o vibratorias.

En edificios con secciones fisuradas las fisuras en los elementos estructurales, que pueden aparecer debido a la acción de cargas cíclicas, reducción de rigidez o sobreesfuerzos y , disminuyen la rigidez global de la estructura. Esto conduce a un aumento en el período de vibración, ya que el edificio se vuelve más flexible. Al volverse más flexible, la estructura tiene una respuesta más lenta a las mismas solicitaciones dinámicas.

- Participación de masa

Al realizar la comparación de la participación de masa de las estructuras para secciones brutas y fisuradas no se notaron cambios significativos, la participación de masa se mantenía constante para ambos casos. La participación de masa en los modos principales en UX, UY, o RZ es similar en ambos casos. Esto puede deberse a la regularidad de las estructuras evaluadas y puede significar que el patrón de vibración del edificio no ha cambiado significativamente. Los mismos elementos estructurales o zonas del edificio siguen absorbiendo la mayoría de las vibraciones, tanto en el caso de secciones sin fisuras como con fisuras.

8.2.2 Misma sección vs Altura

- Periodo de vibración

Como era de esperar, los periodos de vibración aumentan a medida que aumenta la altura de la estructura. En un edificio más alto, la masa total está distribuida a lo largo de una mayor altura. Esto significa que hay más masa a mayores distancias del suelo, lo que aumenta la inercia de la estructura. La inercia mayor reduce la capacidad del edificio para resistir cambios rápidos en su movimiento, lo que se traduce en un mayor período de vibración

- Participación de masa

La participación de masa no varió significativamente respecto a la altura del edificio, se mantuvo constante tanto para secciones fisuradas como para secciones brutas. Debido a que la distribución estructural se mantuvo igual, la masa se distribuye de manera similar en toda la estructura y los modos de vibración no se ven significativamente alterados. La masa en cada modo de vibración depende de qué parte del edificio está movilizándose en respuesta a las fuerzas laterales, y si la distribución estructural es la misma, la masa que participa en cada modo sigue siendo proporcional a la distribución de masas original.

9. Conclusiones

Las conclusiones que se mencionan a continuación hacen referencia a los resultados de los análisis de las estructuras consideradas en el presente estudio, que eran regulares en planta y en altura.

Aunque el uso de secciones fisuradas puede incrementar la masa de una estructura (debido a la necesidad de utilizar mayores secciones de elementos para controlar las derivas de piso), la rigidez es el factor clave que determina la respuesta sísmica. Las secciones fisuradas, al tener una menor rigidez efectiva, generan periodos de vibración más largos, lo que reduce las aceleraciones espectrales y, por ende, las fuerzas sísmicas. Este comportamiento flexible hace que las estructuras diseñadas con secciones fisuradas sean menos susceptibles a grandes demandas de cortante basal.

En las estructuras más altas, la necesidad de ajustar el cortante basal disminuye debido a los periodos largos que caracterizan su respuesta dinámica. A medida que el periodo de vibración se alarga, la aceleración espectral (S_a) disminuye, lo que reduce la demanda de fuerzas sísmicas en la base. Esto implica que, en estructuras altas, la NSR-10 no exige ajustes adicionales en el cortante basal, ya que el espectro de diseño captura de manera adecuada las menores demandas sísmicas para estas condiciones.

La fisuración del concreto reduce la rigidez de la estructura, lo que aumenta el período de vibración. Por lo tanto, es importante considerar la fisuración en los análisis dinámicos, ya que cuando la estructura es sometida a ciclos de carga y descarga por efecto de un sismo, en realidad la estructura está perdiendo rigidez y esto afecta significativamente la flexibilidad de la estructura y, eventualmente, su capacidad para disipar la energía sísmica.

Aunque las fisuras cambian la rigidez y aumentan los períodos de vibración, la distribución de las masas que participan en los modos de vibración no se ve significativamente afectada. Esto indica que el diseño original de la estructura tiene una configuración bien equilibrada en términos de distribución de masa, lo que permite que la estructura mantenga patrones similares de vibración aun con la aparición de fisuras.

Si la estructura está bien diseñada y la distribución de rigidez y masa es adecuada, la aparición de fisuras o el incremento en la altura no modificarán significativamente la manera en que las masas participan en los modos de vibración. Esto refleja la importancia de un buen diseño inicial, que permite que la estructura conserve sus características dinámicas básicas incluso en condiciones adversas (fisuración o mayor altura).

10. Recomendaciones

- Edificaciones de gran altura, como rascacielos

Es importante realizar estudios de edificaciones de gran altura, donde los efectos de la flexibilidad, la fisuración, y la distribución de la masa pueden ser más complejos y significativos. Comparar los resultados obtenidos para edificios medianos con los de rascacielos permitirá evaluar si los patrones observados en edificaciones más bajas se replican o si emergen nuevos fenómenos dinámicos que afecten los modos de vibración y el comportamiento sísmico. Los efectos de los modos superiores y las interacciones entre los diferentes pisos son particularmente importantes en edificios muy altos, y podrían tener un impacto más pronunciado en la respuesta estructural.

- Estudio de edificios con geometrías irregulares

Investigar cómo la fisuración afecta estructuras con geometrías irregulares (plantas en L, edificios asimétricos, etc.) y cómo varía la distribución de la masa participativa en esos casos. Esto sería útil para entender mejor el comportamiento dinámico de edificios más complejos.

Referencias

AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá, Colombia.

Chopra, A. (2017). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (5th ed.). California, Estados Unidos.

Domínguez, M. (2014). Períodos de vibración de las edificaciones. Cali, Colombia.

Mohamed, A., El Kashif, K., Salem, H. (2019). An Investigation of the Fundamental Period of Vibration for Moment Resisting Concrete Frames. Giza, Egypt.

Priestley, M. (2003). Myths and Fallacies in Earthquake Engineering, Revisited CHAPTER 3. Pavia, Italy.

Terán, A., Arroyo, D. y León, J., (2006). Efecto de la degradación de rigidez en el desempeño sísmico de los pisos superiores de edificaciones desplantadas en la Zona del Lago del D.F. Jalisco, México.

Sánchez E. Vargas R. (2018). Análisis y diseño de edificios de concreto armado considerando la rigidez efectiva de sus elementos estructurales. Lima, Perú.

Gama, C. (2019). Efecto de los modos superiores en el análisis y diseño sísmico de edificios altos en suelo blando. C. de México, México.

Hamzah, N. H., Usman, F., & Mat Yatim, M. Y. (2018). Dynamic response of self-supported power transmission tower subjected to wind action. Virginia, Estados Unidos.

G. K., & Mamou, A. (2019). Mass eccentricity effects on the torsional response of inelastic buildings. Kaunas, Lituania.

Hur, J., Althoff, E., Sezen, H., Denning, R., & Aldemir, T. (2017). Seismic assessment and performance of nonstructural components affected by structural modeling. Seúl, Corea del Sur.

Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1993). Seismic code analysis of buildings without locating centers of rigidity. Virginia, Estados Unidos