

**Influencia del Comportamiento Dinámico de una Edificación Regular para la
Selección del Método de Análisis de Resistencia Sísmica**

Álvaro Sebastián Infante Chaparro

Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja

División De Ingeniería y Arquitectura

Facultad De Ingeniería Civil

Tunja

2022

**Influencia del Comportamiento Dinámico de una Edificación Regular para la
Selección del Método de Análisis de Resistencia Sísmica**

Álvaro Sebastián Infante Chaparro

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director de Proyecto:

German Oswaldo Parada Pérez

Ingeniero Civil, Esp.

Codirector de proyecto:

Graciela Carolina Franco Ariza

Ingeniera Civil, PhD

Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja

División De Ingeniería y Arquitectura

Facultad De Ingeniería Civil

Tunja

2022

Dedicatoria

A mi padre, por la confianza y el apoyo incondicional al brindarme la oportunidad de salir adelante.

A Lizbeth Karina por su apoyo constante y acompañamiento en este proceso importante de mi vida.

Agradecimientos

A Dios primeramente por permitirme culminar esta etapa tan fundamental en mi vida.

A la Universidad Santo Tomás por acogerme y brindarme los conocimientos necesarios para afrontar el camino que elegí.

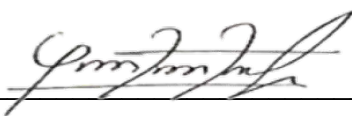
A la Doctora Carolina Franco, por su confianza y apoyo en el desarrollo de este proyecto de investigación y compartirme sus valiosos conocimientos en el área de la ingeniería estructural.

Al Ingeniero Germán Parada, por dirigir esta investigación y hacer parte del proceso.

HOJA DE FIRMAS

El proyecto de grado titulado: **"Influencia del Comportamiento Dinámico de una Edificación Regular para la Selección del Método de Análisis de Resistencia Sísmica"** fue realizada bajo la dirección y supervisión. Este ha sido aprobado y aceptado por los directores asignados como opción de grado para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL



German Oswaldo Parada Pérez

Director – Esp. Ingeniería Civil



Graciela Carolina Franco Ariza

Codirectora - PhD. Ingeniería Civil

Índice de Contenido

1. Resumen.....	15
2. Abstract	16
3. Introducción	17
4. Problema de Investigación	18
4.1. Descripción de la Problemática	18
4.2. Delimitación del Caso de Estudio	19
4.3. Preguntas de Investigación	19
4.4. Justificación.....	19
4.5. Objetivos	20
5. Estado del Arte	22
5.1. Análisis Dinámico de las Estructuras	24
5.2. Modelos Unidimensionales para el Análisis de Estructuras	28
5.3. Métodos de Análisis Dinámico Según Reglamentación Colombiana (NSR-10)	34
6. Materiales y Métodos.....	41
6.1 Caso de estudio: Edificaciones Hipotéticas	41
6.2 Metodología.....	42
7. Análisis y Resultados.....	44
7.1 Casos de Estudio	44
7.2 Descripción de las estructuras de estudio.....	45
7.3. Geometría de las edificaciones de estudio	47
7.4 Análisis Sísmico	49

7.5 Comparación Entre el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente y el Método de Análisis Dinámico Elástico.	68
8. Conclusiones y Recomendaciones	85
9. Glosario.....	89
10. Referencias Bibliográficas.	92
11. Anexos	96

Índice de Tablas

Tabla 1.	41
Especificaciones de los casos de estudio.	41
Tabla 2.	44
Descripción general de las edificaciones de estudio	44
Tabla 3.	45
Descripción de los elementos de los casos de estudio	45
Tabla 4.	46
Características mecánicas del concreto empleado en los elementos.	46
Tabla 5.	46
Características mecánicas del acero de refuerzo empleado en los elementos.	46
Tabla 6.	49
Parámetros para el Espectro de Diseño en la ciudad de estudio.	49
Tabla 7.	50
Valores de S_a y T	50
Tabla 8.	52
Evaluación de carga de entrepiso. Caso de estudio #1.	52
Tabla 9.	52
Evaluación de carga de entrepiso. Caso de estudio #2	52
Tabla 10.	53
Evaluación de carga de entrepiso. Caso de estudio #3	53

Tabla 11.	54
Masas de las edificaciones de estudio.....	54
Tabla 12. Valores de C_t y α . Casos de Estudio.	55
Tabla 13.	56
Valores de Periodos Fundamental aproximado. Casos de estudio.	56
Tabla 14.	56
Valores de S_a . Casos de estudio	56
Tabla 15.	57
Valores de Cortante Basal. Casos de Estudio.....	57
Tabla 16.	58
Valores de k . Casos de Estudio.	58
Tabla 17.	58
Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso. Caso 1.	58
Tabla 18.	59
Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso. Caso 2.	59
Tabla 19.	61
Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso eje x. Caso 3.....	61
Tabla 20.	61
Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso eje Y. Caso 3.	61
Tabla 21.	63
Valores de R . Casos de estudio.....	63

Tabla 22.	65
Modos de vibración y participación de masa. Caso 1.	65
Tabla 23.	66
Modos de vibración y participación de masa. Caso 2.	66
Tabla 24.	67
Modos de vibración y participación de masa. Caso 3.	67
Tabla 25.	68
Modos de Vibración. Casos de Estudio.	68
Tabla 26.	69
Razones de frecuencia. Casos de estudio.....	69
Tabla 27.	73
Cortantes Estáticos y Dinámicos. Caso 1.	73
Tabla 28.	74
Cortantes Estáticos y Dinámicos. Caso 2.	74
Tabla 29.	74
Cortantes Estáticos y Dinámicos. Caso 3.	74
Tabla 30.	81
Propiedades de piso, K_s , K_i , K_g y Λ . Casos de Estudio.....	81
Tabla 31.	83
Constantes macroscópicas. Casos de Estudio.....	83
Tabla 32.	83

Valores en X e Y de las Constantes Macroscópicas. Casos de Estudio.	83
--	----

Índice de Figuras

Figura 5.1.	27
Modos de Vibración	27
Fuente: Eftekhar Azam et al., (2015)	27
Figura 5.2.	33
Gráfico del comportamiento que gobierna una edificación e identificación de los mecanismos idealizados en estructuras simples	33
Figura 5.3.	34
Espectro elástico de aceleraciones como fracción de g.	34
Figura 5.4.	36
Desplazamientos mediante fuerzas horizontales	36
Figura 7.1.	47
Modelo numérico. Caso de estudio #1.....	47
Figura 7.2.	48
Modelo numérico. Caso de estudio #2.....	48
Figura 7.3.	48
Modelo numérico. Caso de estudio #3.....	48
Figura 7.4.	51
Espectro de aceleraciones de diseño	51
Figura 7.5.	59
Distribución de fuerzas en X y Y de la estructura por FHE. Caso 1.....	59
Figura 7.6.	60

Distribución de fuerzas en X y Y de la estructura por FHE. Caso 2.....	60
Figura 7.7. Distribución de fuerzas en X y Y de la estructura por FHE. Caso 3.	62
Figura 7.8.	64
Definición de Espectro Elástico de Diseño. Casos de estudio.	64
Figura 7.9.	69
Mecanismos dinámicos en función de sus razones de frecuencia.....	69
Figura 7.10.	70
Desplazamientos en X según modos Normalizados. Casos de estudio.	70
Figura 7.11.	71
Desplazamientos en X según modos Normalizados. Casos de estudio.	71
Figura 7.12.	72
Desplazamientos en Y según modos Normalizados. Casos de estudio.	72
Figura 7.13.	72
Desplazamientos en Y según modos Normalizados. Casos de estudio	72
Figura 7.14.	75
Cortantes Estáticos en X. Casos de Estudio.	75
Figura 7.15.	76
Cortantes Dinámicos en X. Casos de Estudio.	76
Figura 7.16.	76
Cortantes Estáticos en Y. Casos de Estudio.	76
Figura 7.17.	77

Cortantes Dinámicos en Y. Casos de Estudio.	77
Figura 7.18.	77
Errores relativos entre cortantes en X. Casos de estudio.	77
Figura 7.19.	78
Errores relativos entre Cortantes en Y. Casos de estudio.....	78
Figura 7.20.	80
Condiciones límite de modelación para un solo piso.....	80
Figura 7.21.	80
Deformación por fuerza cortante de un Piso en Etabs. Caso 3, Superior: Sección longitudinal, Inferior: Sección transversal	80
Figura 7.22	84
Identificación del Comportamiento Dinámico de los Casos de Estudio.	84

1. Resumen

Título:

Influencia del Comportamiento Dinámico de una Edificación Regular para la Selección del Método de Análisis de Resistencia Sísmica*

Autor:

INFANTE CHAPARRO, Alvaro Sebastian**

Palabras Claves:

Análisis Dinámico, Resistencia Sísmica, Edificación Regular, Parámetros Dinámicos, Modelo Numérico.

Contenido:

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), exige emplear métodos para realizar un análisis dinámico de una determinada estructura con base en su geometría e irregularidad. Sin embargo, la integración de elementos que aportan rigidez al sistema de resistencia sísmica de la edificación (Muros o arrostramientos), no son tenidos en cuenta como criterio de selección en el método de análisis dinámico. El objetivo principal de esta investigación, es estudiar la influencia de los elementos de gran rigidez que intervienen en el comportamiento dinámico de las estructuras, mediante análisis relativos en sus parámetros modales, a través de métodos de análisis de resistencia sísmica, como el método de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) y Análisis Dinámico Elástico, requeridos por el reglamento (NSR-10), en edificaciones de hormigón armado regulares y simétricas en su plano vertical y horizontal de 10 niveles. Las edificaciones propuestas, tienen variaciones en la geometría de sus elementos y distanciamiento entre sus elementos verticales, para predefinir un comportamiento dinámico propio y diferente para los casos de estudio como lo son comportamiento a cortante, flexión interna y flexión global. Los resultados obtenidos muestran un aumento en la diferencia entre las fuerzas sísmicas obtenidas entre el método FHE y el ADE a medida que el contraste de rigidez entre los elementos incrementa. Con base en lo anterior, esta investigación plantea como posibilidad, considerar el mecanismo que gobierna el comportamiento dinámico de una edificación como parámetro importante para la selección del método de análisis de resistencia sísmica. Con los resultados obtenidos, se logra inferir que la correcta selección de la metodología de análisis de base y la comprensión del funcionamiento estructural, se pueden traducir en la reducción de sobre costos de construcción de la edificación.

2. Abstract

Title:

Influence of the Dynamic Behavior of a Regular Building for the Selection of the Seismic Resistance Analysis Method *

Author:

INFANTE CHAPARRO, Alvaro Sebastian**

Key Words:

Dynamic Analysis, Seismic Resistance, Regular Building, Dynamic Parameters, Numerical Model.

Content:

The Colombian Code for Seismic Design and Construction (NSR-10) requires the use of methods to perform a dynamic analysis of a given structure based on its geometry and irregularity. However, the integration of elements that provide stiffness to the seismic resistance system of the building (walls or bracing) are not taken into account as a selection criterion in the dynamic analysis method. The main objective of this research is to study the influence of the high stiffness elements involved in the dynamic behavior of the structures, by means of relative analysis in their modal parameters, through seismic resistance analysis methods, such as the Equivalent Horizontal Force (EHF) method and Elastic Dynamic Analysis, required by the regulation (NSR-10), in regular and symmetrical reinforced concrete buildings in their vertical and horizontal plane of 10 levels. The proposed buildings have variations in the geometry of their elements and spacing between their vertical elements, to predefine their own dynamic behavior and different for the cases of study, such as shear, internal bending and global bending behavior. The results obtained show an increase in the difference between the seismic forces obtained between the FHE and ADE methods as the stiffness contrast between the elements increases. Based on the above, this research raises the possibility of considering the mechanism that governs the dynamic behavior of a building as an important parameter for the selection of the seismic resistance analysis method. With the results obtained, it can be inferred that the correct selection of the basic analysis methodology and the understanding of the structural performance can be translated into the reduction of construction cost overruns of the building.

3. Introducción

La reglamentación sismo resistente a nivel mundial establece parámetros mínimos de diseño a toda edificación que se identifique como sismo resistente, es decir, que esté compuesta por un sistema estructural y cumpla con las dimensiones y parámetros mínimos de diseño en sus elementos, establecidos por la normativa local. Actualmente, estos diseños se realizan en conjunto con la ayuda de programas computacionales, que modelan y someten bajo condiciones de carga las edificaciones, las cuales dan una idea del comportamiento real de la estructura, permitiendo con esto, otros análisis dinámicos más detallados con la obtención y recopilación de datos cualitativos y cuantitativos de la edificación.

La optimización e implementación de nuevos métodos de análisis, evaluación y diseño que garanticen la calidad y seguridad de las estructuras han llevado a idear formas simplificadas de describir el comportamiento de una edificación, asociándolo a tres mecanismos de funcionamiento, cortante, flexión global y flexión interna, Franco et al, (2019), en los que intervienen parámetros importantes como la masa y el contraste entre la rigidez de vigas y columnas. Esto nos lleva a inferir que alguna combinación o variación en estos elementos o interacciones, podrían presentar cambios en sus comportamientos dinámicos pudiendo ser relevante en el diseño ante solicitaciones sísmicas. Dentro de estas metodologías se encuentra el método de Homogenización de Medios Discretos Periódicos (HPDM por sus términos en inglés), la cual busca simplificar el análisis dinámico de edificaciones regulares y periódicas a partir de la comprensión de su funcionamiento mecánico. El término “periódica” hace referencia a una edificación que tiene un piso tipo que se repite en la totalidad o casi la totalidad de la altura de la edificación como sucede en gran parte de los edificios actuales.

Es así como surge la propuesta de analizar las edificaciones regulares típicas colombianas de tipo pórtico en hormigón armado, las cuales cumplen con los requisitos de análisis del HPDM, esto con la finalidad de identificar el tipo de funcionamiento mecánico

(cortante, flexión global y flexión interna), Franco et al, (2019) y asociar ese funcionamiento con los resultados obtenidos de la comparación entre el uso de los métodos de Fuerza Horizontal Equivalente (NSR-10: A.3.4.2.1) y Análisis Dinámico Elástico (NSR-10: A.3.4.2.2). Se realizará la identificación de los parámetros modales tales como frecuencias naturales, y modos de vibración de las diferentes edificaciones estudiadas. Como parte de los resultados, se busca realizar una propuesta para mejorar la selección de los métodos de análisis de las edificaciones a solicitaciones sísmicas a lo ya establecido en la reglamentación colombiana..

4. Problema de Investigación

La normativa sismo resistente actual creada a través de la ley 400 de 1997, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), determina los requerimientos mínimos de análisis dinámico para que una edificación cumpla con los parámetros de sismo resistencia, (Sísmica, A. 2010). El comportamiento dinámico de una edificación es excluido de la selección del método de análisis privilegiando parámetros geométricos como la altura o la irregularidad. Este comportamiento dinámico puede ser caracterizado fácilmente a través de un análisis estático y asociado a mecanismos de flexión global, cortante o flexión interna. El conocimiento del comportamiento de la edificación puede ser relevante en la distribución de fuerzas sísmicas en la edificación y por ende la selección del método de análisis.

4.1. Descripción de la Problemática

Los métodos tradicionales de resistencia sísmica, como el método de la Fuerza Horizontal equivalente y el Método del Análisis Dinámico Elástico, tienen diferencias considerables en los valores calculados de las fuerzas sísmicas y cortantes de piso (Lizcano Carreño & Tobo Cáceres, 2019), lo cual genera incertidumbre en los cálculos causando sobredimensionamiento en los elementos estructurales de la edificación y así mismo, elevando los costos de construcción de las edificaciones.

4.2. Delimitación del Caso de Estudio

En este estudio se analizarán edificaciones de 10 niveles en hormigón armado, compuestos por elementos de gran rigidez como muros, dada la existencia de elevadores y escaleras independientes de su sistema estructural. La adición de estos elementos pueden alterar el comportamiento de la estructura. Se comparan los resultados obtenidos a partir de los métodos de análisis de resistencia sísmica respetando los lineamientos exigidos por la norma.

4.3. Preguntas de Investigación

La presencia de elementos que aporten rigidez en la estructura como muros, pueden tener una gran influencia en el mecanismo que gobierna la edificación, ¿Los métodos de la Fuerza Horizontal Equivalente y el método de Análisis Dinámico Elástico, presentan diferencias significativas en sus análisis, en presencia de elementos que aportan gran rigidez al sistema de resistencia sísmica, que gobierna en una edificación de 20 niveles o menos?

4.4. Justificación

Esta investigación busca corroborar la veracidad de los datos obtenidos de los métodos de análisis dinámico, exigidos por la normativa sismo resistente colombiana (NSR-10) mencionados en el título A, mediante metodologías homólogas que simulen un comportamiento afín que, validen los resultados obtenidos luego de emplear los métodos de análisis propuestos.

Esta norma sugiere la selección de métodos de análisis sísmico de las edificaciones con base en su altura, irregularidad y localización sísmica. Sin embargo, ningún criterio de selección de acuerdo al comportamiento mecánico es incluido. Las construcciones recientes de edificaciones de gran altura integran elementos que aportan gran rigidez al sistema de resistencia sísmica de la edificación (muros o arriostramientos). Esta investigación postula la posibilidad de incluir el comportamiento dinámico que gobierna la edificación, como parámetro importante para la selección del método de resistencia sísmica, evaluando los contrastes entre

sus elementos verticales (columnas o muros) y elementos horizontales (Vigas o losas de entrepiso) mediante modelos numéricos que evalúen el comportamiento dinámico de una estructura mediante parámetros modales, empleando métodos de análisis equivalentes en una edificación típica colombiana en hormigón armado, para así, compararlos con los resultados obtenidos mediante un análisis con los métodos exigidos por la reglamentación. El emplear métodos conservadores, relaciona una diferencia significativa en los valores obtenidos en las fuerzas sísmicas con métodos más compuestos, las cuales influirían de manera significativa en el aumento o disminución de las secciones geométricas de la edificación. Es por esto, que la correcta selección del método de análisis de resistencia sísmica y la comprensión del funcionamiento estructural, se pueden traducir en sobre costos o ahorro en la construcción de las edificaciones.

A partir de la problemática que se ha evidenciado a nivel nacional e internacional, se busca la asociación con investigadores internacionales que son de aporte significativo a esta nueva metodología dentro y fuera del país, con el objeto de dar aportes relevantes en el campo de la ingeniería estructural colombiana.

4.5. Objetivos

4.5.1. Objetivo General:

Analizar la influencia del cambio de comportamiento dinámico de edificaciones de 20 niveles o menos que presenten elementos adicionales de gran rigidez en la selección de métodos de resistencia sísmica demandados por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10).

4.5.2. Objetivos Específicos:

- Analizar tres edificaciones supuestas tipo pórtico en hormigón armado, simétricas en el plano horizontal con los mismos niveles en altura, diferentes comportamientos dinámicos (flexión global, cortante o flexión interna).
- Elaborar un modelo numérico de las tres estructuras propuestas mediante software ETABS.
- Aplicar a cada estructura el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico.
- Implementar un código de programación desarrollado en Matlab del método HPDM por (Franco et al, 2019), para el análisis modal y la identificación del comportamiento dinámico de las edificaciones.

5. Estado del Arte

Las metodologías simplificadas en los análisis dinámicos de las edificaciones, han sido indispensables en los estudios de los comportamientos dinámicos internos de las estructuras, presentándolo localmente en interacciones muros-vigas definiéndolos en los grados de acoplamiento o en los acoplamientos en los cortantes de los muros, definiendo estos métodos como óptimos para un ingeniero en servicio en el momento de agilizar y diagnosticar los cálculos y comportamientos de una estructura, (Chaallal, et al, 1996). Con base en lo anterior y el uso de estas metodologías, se puede dar un análisis preliminar, simulando el comportamiento dinámico de una edificación a cortante, debido a elementos de reforzamiento como muros, cerchas, marcos y muros de corte acoplados, los cuales a pesar de que aún no estén predefinidos, pueden llegarse a una simulación cercana que prevea su comportamiento real en condiciones del servicio, analizando elementos homólogos simplificados de sus componentes de análisis (Pötzta, et al, 2003).

Este proyecto se inspira de los resultados reportados en estudios de homogenización de medios discretos. La metodología implementada en esos estudios consiste en modelar y emplear teorías de vigas como las definidas por Timoshenko para la modelización simplificada de estructuras reticuladas y periódicas como los edificios de pórticos o muros. Como resultado se puede definir el mecanismo dinámico que gobierna en una edificación con base en su geometría y materiales permitiendo la evaluación de sus parámetros modales como frecuencias y sus periodos de vibración, (Boutin, et al., 2003). En apoyo, el método de análisis de homogenización de medios discretos periódicos (HPDM), establece un modelo numérico de elementos estructurales donde se analiza parámetros propios de una edificación simplificada que evalúe los periodos y modos naturales de la misma, (Chesnais, et al., 2011).

El desarrollo de estas metodologías homologas, permiten simular no solamente estructuras en concreto armado, si no elementos de otros materiales con funcionalidades

diferentes sometidas bajo esfuerzos similares, buscando la misma finalidad en el análisis de su comportamiento, en el caso de brazos de puente grúas como vigas o antenas espaciales como una losa.

Para el análisis de edificaciones de gran altura, esta metodología nos permite evaluar desplazamientos en dichas estructuras, conociendo que, estos análisis van en función de la masa, la rigidez y la altura, permitiendo así analizar, cualquier combinación comprendida de muros de corte, muros acoplados, muros rígidos y pórticos arriostrados, aplicando la teoría de deflexión, involucrando propiedades propias estructurales como la rigidez individual con la deformación de los muros a nivel local y global, proporcionando estimaciones rápidas en las derivas de una edificación de gran altura, además de brindar diferentes formas idóneas de soluciones estructurales para un edificio alto, (Smith, B. S., et al,1984). Los métodos simplificados, permiten definir el comportamiento de todo el edificio analizando un pórtico de una sola planta, mediante análisis modales basados en formulaciones analíticas con base en otras metodologías, como la de Euler-Bernoulli, evidenciando que, si los elementos propios presentan características geometrías inadecuadas, estos pueden afectar directamente en el comportamiento dinámico de la estructura, en la interacción viga-columna cuando la esbeltez es propia de alguno de los elementos, (Falcão, Jonas et al., 2020).

Para Colombia y los métodos de análisis de resistencia sísmica, para este caso, las diferencias encontradas en la Fuerza Horizontal Equivalente y el Análisis Dinámico Elástico, surgen en los resultados de sus fuerzas horizontales y cortantes de piso, en la que su variación radica en los parámetros y análisis que pueden ser desarrollados en alguno de los dos métodos. Para la Fuerza Horizontal Equivalente, trabaja y utiliza un solo periodo de vibración, mientras que el Análisis Dinámico Elástico, tiene diferentes periodos de vibración en cada uno de los modos de vibración empleados, hasta que la participación de la masa total del edificio sea de un 90% que es el mínimo requerido por la normativa local. Con base en lo anterior,

podemos inferir el nivel de incertidumbre que puede generar la Fuerza Horizontal Equivalente en sus altos valores de F_s es alto, comparado con el Análisis Dinámico Elástico (Gil, John., 2012).

Las limitancias entre cada uno de estos métodos, puede ampliarse debido a los casos en los que puede ser empleado, si su edificación es definida como regular o irregular, niveles en altura y parámetros de zonificación. Esto puede influir aún más en los resultados entre los métodos en cuestión, debido a que un análisis estático tiende a ser más conservador en sus resultados que un análisis dinámico, esto implica un alza en los valores obtenidos y así mismo, encontrar en los diseños estructurales secciones transversales de gran tamaño que aporten rigidez al sistema, logrando así contrarrestar los excesos en los desplazamientos producidos por las fuerzas horizontales (Lizcano Carreño & Tobo Cáceres, 2019).

5.1. Análisis Dinámico de las Estructuras

5.1.1. Propiedades dinámicas de las estructuras

Las propiedades dinámicas de una estructura son variables propias de las edificaciones que intervienen directamente en los análisis dinámicos, estas son: masa, rigidez, amortiguamiento, periodo o frecuencia, entre otras. Estas propiedades cumplen un papel fundamental en los análisis de resistencia sísmica, puesto que la omisión y/o una correcta estimación de los mismos, pueden incurrir en fallas importantes en los cálculos sobre la descripción de la edificación brindando resultados erróneos sobre el comportamiento real de la estructura.

5.1.2. Masa

La masa es una de las propiedades más importantes en el análisis dinámico de una edificación debido a la directa implicación que esta tiene en cada una de las variables de estudio en una estructura. En función de la masa, podemos evaluar sus características

dinámicas como desplazamientos, torsiones, vibraciones, amortiguamientos y demás variables propias presentadas en el momento de una excitación sísmica. Dichas características pueden ser mayores o menores dependiendo del nivel de masa que posea la edificación, dejándola como una variable propia y fundamental en los análisis dinámicos de una edificación. El cálculo de la misma puede darse mediante del peso unitario del material y el volumen que ocupa en el espacio, las unidades características para la masa en cada uno de los sistemas de medición, están dadas en Kilogramo (kg), Onza (oz), Libra (lb) y Tonelada (Ton).

5.1.3. Rigidez

Cualquier elemento con características elásticas al ser sometido a fuerzas estáticas o dinámicas externas sufre deformaciones. El concepto de rigidez nace de la relación entre las fuerzas externas y la deformación que éstas producen en el elemento. Este concepto se relaciona habitualmente mediante el uso de la letra **k**. Matemáticamente, la rigidez se encuentra en la literatura expresada como la relación entre una fuerza aplicada en un punto determinado (**P**) y una deflexión, este último término se relaciona con la letra **u**, definiéndolo como la fuerza necesaria aplicada a un elemento para que produzca una rotación o deflexión unitaria. (Reyes, L. E. G.,1998). El análisis dimensional encontrado para esta variable, en los sistemas de unidades se encuentra dado en kN/m, Ton/m o MPa/m.

5.1.4. Frecuencia – Periodo

La gran mayoría de los modelos dinámicos en edificaciones, son reducidos a modelos de sistemas masa-resorte, cuando hablamos de periodo en estos sistemas, podría definirse como el tiempo necesario para cumplir con un ciclo completo de vibración con base en un punto de referencia. En el análisis dinámico, cuando el periodo del suelo armoniza con el periodo de la edificación, se produce el fenómeno de resonancia, la cual aumenta una amplificación en las fuerzas horizontales actuantes en la edificación (Corzo, K., 2005). La

frecuencia de vibración corresponde al número de ciclos completos de vibración en un periodo de tiempo.

$$[5.1] T = \frac{1}{f}$$

Donde T es periodo y está dado en segundos (s) y F es la frecuencia, que está dada por segundos a la menos 1 (s^{-1}).

5.1.5. Amortiguamiento

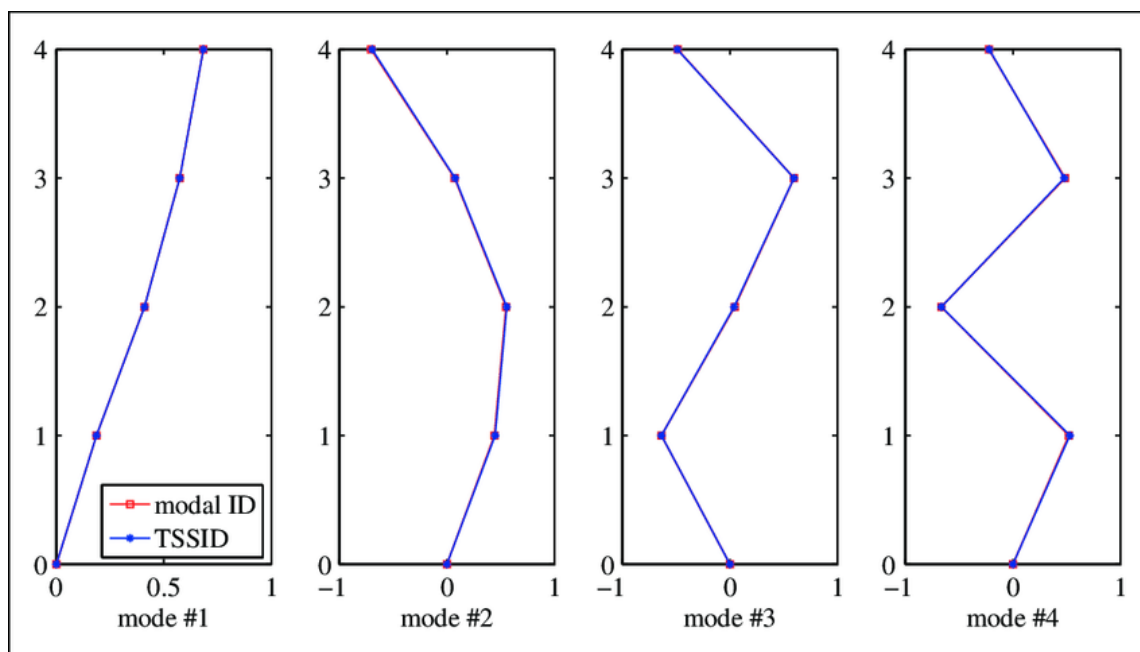
Propiedad en la que un sistema disipa la energía y vuelve a su punto inicial. En las edificaciones, el valor de amortiguamiento está relacionado directamente con la condición elástica de deformación en las columnas y vigas. Este valor está dado de manera porcentual denominado “porcentaje de amortiguamiento crítico”, el cual consiste en que un sistema masa-resorte, regresa a su condición de reposo luego de ser desplazado de su posición inicial por una fuerza horizontal (Corzo, K., 2005). Para la NSR-10 y el desarrollo del espectro de diseño para el método de la fuerza horizontal, define que el valor de S_a , en su numeral A.2.6.1 para estructuras de concreto, corresponde para un valor del 5% del amortiguamiento crítico.

5.1.6. Formas modales

Las formas modales, son propiedades únicas de la estructura, ya que estas formas no dependen de que la edificación esté sometida a estrés dinámico (cargas o fuerzas). Estos modos pueden variar si las propiedades de la edificación cambiaron o, si las propiedades de los materiales en términos de masa, amortiguamiento o rigidez son diferentes. Estas formas están relacionadas con resonancia estructural, debido a que cualquier estructura, puede resonar, es decir, bajo condiciones idóneas, se puede hacer que una edificación vibre sostenidamente y desmedidamente. Un ejemplo claro se ve, cuando se golpea una campana con una esfera

rígida, la cual provoca que esta vibre en resonancia, en cambio, golpear un saco de harina, no genera que este entre en resonancia. Este efecto es provocado por la interacción entre materiales inerciales y elásticos de una edificación, el cual es catalogado como uno de los grandes problemas relacionados a las vibraciones de las edificaciones. Dentro de los problemas encontramos fallas y fatigas prematuras del material, los cuales son factores que influirían directamente en la disminución de la vida útil de la edificación. Para identificar estos problemas, se definen los modos de vibración, los cuales son: Frecuencia modal, amortiguación modal y forma de modo (Richardson, M. H., 1997), tal como se muestra en la figura 5.1.

Figura 5.1.
Modos de Vibración



Fuente: Eftekhar Azam et al., (2015)

5.2. Modelos Unidimensionales para el Análisis de Estructuras

A través del tiempo se han venido creado e implementado metodologías que simplifican los análisis de las estructuras, basándolos y reduciéndolos a elementos simples unidimensionales o bidimensionales, con características similares a las del objeto en estudio. Estas metodologías permiten reducir características globales a locales, con elementos que representen los sistemas tradicionales de masa-resorte, en los que se pueden hallar mediante ecuaciones dinámicas diferenciales, los esfuerzos de análisis a cortante, torsión y flexión. A continuación, en los siguientes numerales, se presentarán algunas de las metodologías más reconocidas para este tipo de análisis.

5.2.1. Modelos clásicos de viga

Para este estudio, se presenta una breve descripción de los métodos previos existentes para los cálculos de modelos de viga equivalente. Como se mencionó anteriormente, estos modelos permiten obtener y establecer características globales con tan solo analizar un elemento unidimensional horizontal, o viga, de cualquier sección de la edificación. Entre estos métodos encontramos el modelo de masas concentradas y los modelos de viga equivalente propuestos por Euler – Bernoulli y Timoshenko.

5.2.1.1 Cortante (Modelo de masas concentradas)

Para los edificios, la masa particularmente se encuentra concentrada en sitios específicos de las estructuras que se pueden identificar de manera sencilla. Con base en lo anterior, el método de masas concentradas es el principal modelo dinámico a considerar en estos análisis debido a su eficiencia en la aplicación y en la obtención de los datos. Las estructuras continuas permiten modelizarse habitualmente como modelos de masas concentradas, unidas mediante resortes. Las fuerzas inerciales producidas en la edificación

durante su periodo de vibración, se simulan de manera real mediante masas que se encuentran concentradas en puntos anteriormente ya definidos de la estructura. Las respuestas dinámicas de las estructuras se definen matemáticamente mediante expresiones denominadas ecuaciones del movimiento. Estas ecuaciones se obtienen mediante la aplicación de cualquiera de los principios de mecánica elástica, como el de Hamilton, Hooke, entre otros. Para las edificaciones, los modelos dinámicos más usados son pórticos tridimensionales o a cortante (Rotondo, L. M. B., & Barbat, A. H., 1999).

5.2.1.2 Euler-Bernoulli

El modelo equivalente propuesto por Euler – Bernoulli se describe mediante la ecuación dinámica [2], la cual es utilizada para describir el comportamiento a flexión en las vigas sometidas a fuerzas axiales. Esta ecuación es aplicable en algunos casos, dependiendo consideraciones de análisis y de la misma estructura.

$$[5.2] K_g \frac{d^4 u(x)}{dx^4} - \Lambda \omega^2 u = 0 \quad \text{Para } 0 < x < H$$

5.2.1.3 Modelo de Viga de Timoshenko.

Este teorema trabaja con base en las primeras hipótesis propuestas por Euler-Bernoulli. Este modelo analiza las deformaciones producidas por cizallamiento el cual es el apropiado para describir el comportamiento de vigas cortas, vigas sometidas a frecuencias de excitación altas cuando el espesor de la viga es aproximado a la longitud de onda. A diferencia de la teoría de Euler-Bernoulli, la ecuación es de orden 4° debido a que los mecanismos agregados de deformación efectiva tienden a reducir la rigidez de la viga obteniendo, así como resultado un aumento en su deflexión bajo cargas estáticas.

Cuando la longitud de onda se hace más corta, este efecto es más notable debido a un aumento de las frecuencias reduciendo la distancia comprendida entre las fuerzas opuestas de

cizallamiento. Cuando el módulo de corte del material de la viga tiende a infinito, este ignora los efectos de rotación de la inercia volviendo así a la teoría de Euler-Bernoulli (Conesa Costa, A., 2013).

Para el modelo de Viga de Timoshenko, las ecuaciones dinámicas adaptadas para el método de homogeneización están dados por las expresiones [3] y [4] en función de la rigidez a cortante (K_s) la rigidez a flexión global (K_g) y la rigidez a flexión interna (K_i), (Franco Ariza, 2021).

$$[5.3] \quad K_g \left(\frac{d^4 u(x)}{dx^4} + \frac{\Lambda \omega^2}{K_s} \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \right) - \Lambda \omega^2 u = 0 \quad \text{Para } 0 < x < H$$

$$[5.4] \quad K_i \left(\frac{d^4 u(x)}{dx^4} - K_s \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \right) - \Lambda \omega^2 u = 0 \quad \text{Para } 0 < x < H$$

5.2.2. Resultados de la implementación de métodos de homogeneización en estructuras reticuladas

El método de homogeneización de medios discretos, presenta resultados positivos en los análisis de las vibraciones de marcos periódicos en estructuras no arriostradas, permitiendo así, ideas globales sobre el comportamiento que gobierna en estructuras de marco múltiple.

Desde un punto de vista práctico, el diagnóstico en los análisis mediante el uso de viga equivalente, permite preliminarmente dar resultados acertados para considerarse como un criterio simple, es decir, la posibilidad de determinar esfuerzos y deformaciones en escalas locales y/o globales de un elemento (Boutin, C., & Hans, S., 2003).

En estructuras reticuladas, el método busca suministrar criterios simples que posibiliten la identificación en la ocurrencia de los modos de giro definiendo acciones externas de validez. Con validaciones numéricas, podrían plantearse sistemas simples reticulados para confirmar de manera experimental el comportamiento característico de estos modos. El método de

homogeneización, resuelve generalidades que pueden analizarse con un método más complejo, esto brinda una fiabilidad en el momento del método de análisis, en los que empleando y complementando los modelos de viga de Euler-Bernoulli con el de Timoshenko, los modelos de vigas reticulados pueden ser estudiados de forma completa en escalas locales o globales (Chesnais, et al., 2011).

La aplicación de la homogeneización trabaja no solamente elementos locales estructurales, puede analizar situaciones globales en edificaciones con base en generalidades geométricas, donde se define y predomina el mecanismo dinámico que gobierne en la estructura, estos parámetros definidos en las leyes constitutivas de la viga son, cortante, flexión global e interna. Los resultados encontrados en estos análisis son basados en análisis dimensionales modales, los cuales como ya se mencionó anteriormente, con criterios simples, se pueden identificar y definir modelos para edificaciones reales que permitan realizar un estudio en su comportamiento de manera óptima, disminuyendo los tiempos en los análisis digitales (Hans, S., & Boutin, C., 2008).

En cada estudio generado, se demuestra cada vez más la eficiencia del método a pesar de ser completamente analítico. La definición de los periodos de vibración se obtiene de una manera sencilla, lo cual es interesante debido a que cada uno de los comportamientos dinámicos de las edificaciones, no vibran de la misma manera debido a sus diferencias en la rigidez y no se encuentran dentro de una misma frecuencia. Cuando encontramos mecanismos en la misma frecuencia, el método permite analizar el fenómeno producido denominado como resonancia interna, el cual no presenta problemas en los análisis puesto que, al tener una longitud de onda mayor, permite homogeneizar el comportamiento de la edificación debido a la presencia de elementos resonantes. Esto reduce considerablemente el nivel de cálculo en comparación a un modelo de elementos finitos de la edificación completa y, por otro lado,

permite entender el funcionamiento de la estructura, definiendo que el alcance del método es amplio, y no solo podría emplearse para modelar edificaciones (Chesnais, C., 2010).

Cada estudio anterior, demuestra los avances en la aplicación del método en estructuras multiportico encontrando falencias o fortalezas para posibles mejoras o ajustes en el análisis. Para ello, se han realizado comparaciones de modelos numéricos realizados en elementos finitos, con ayuda de software computacionales y los modelos de viga equivalente mediante homogeneización, donde analizando las relaciones vigas-columna, pisos-muros y definiendo su mecanismo dinámico predominante. Estos estudios, aportan al ingeniero en servicio, opciones optimizadas en la elección del método de análisis dinámico de edificaciones, que le brinden información verídica necesaria para los estudios de resistencia sísmica de edificaciones y posibles estudios de vulnerabilidad (Franco, C., et al, 2019).

5.2.3. Criterio de identificación del comportamiento estructural

Para la identificación del comportamiento dinámico en una estructura, es necesario realizar un análisis adimensional producto de la formulación de un modelo de viga equivalente, el cual, mediante una ecuación diferencial resultado de combinar las ecuaciones de equilibrio y leyes constitutivas, permite una identificación directa de la edificación, esta ecuación [5] está dada de la siguiente manera:

$$[5.5] \frac{EI_{\mu}EI_M}{K}U^{(6)}-(EI_M+EI_{\mu})U^{(4)}-\frac{EI_M}{K}\Lambda\omega^2U''+\Lambda\omega^2U=0$$

La semejanza entre los comportamientos de cortante y flexión global con flexión interna y global, compone un nuevo parámetro de identificación, estos son descritos mediante las ecuaciones [5] y [6]:

$$[5.6] C=\frac{EI_{\mu}}{KL^2}=\epsilon^x$$

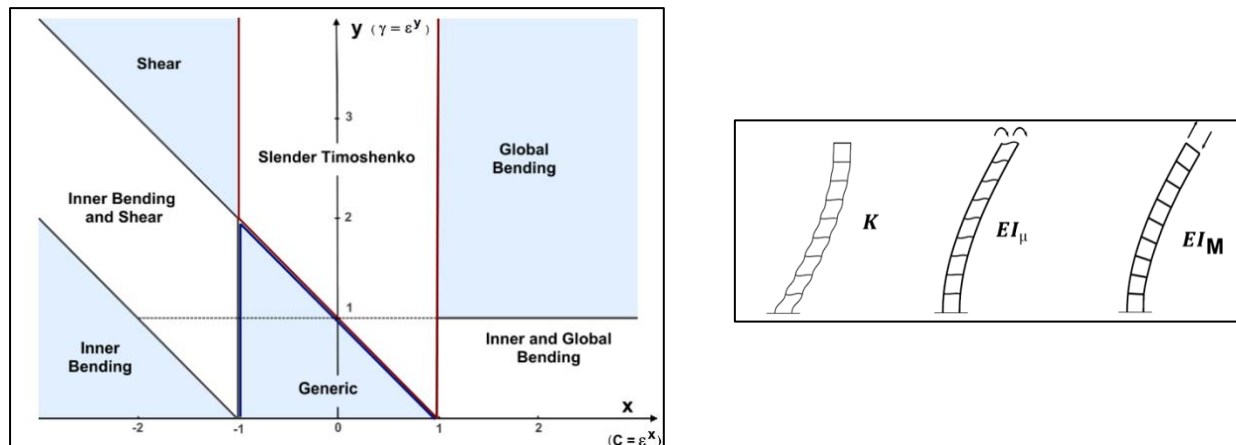
$$[5.7] \gamma = \frac{EI_{\mu}}{EI_M} = \varepsilon^{\gamma}$$

Dónde: C y γ son constantes macroscópicas (Franco, C. et al, 2019).

Estos nuevos criterios evitan la reimplementación del método de homogeneización en el proceso evaluativo, dejando los resultados en valores de coordenadas X e Y , en el cual, el factor de escala ε , con base en los resultados obtenidos de las constantes C y γ , es un instrumento de rápida respuesta en la identificación del comportamiento dinámico de las estructuras (Hans et al, 2008).

Figura 5.2.

Gráfico del comportamiento que gobierna una edificación e identificación de los mecanismos idealizados en estructuras simples.



Fuente: Hans et al, (2008).

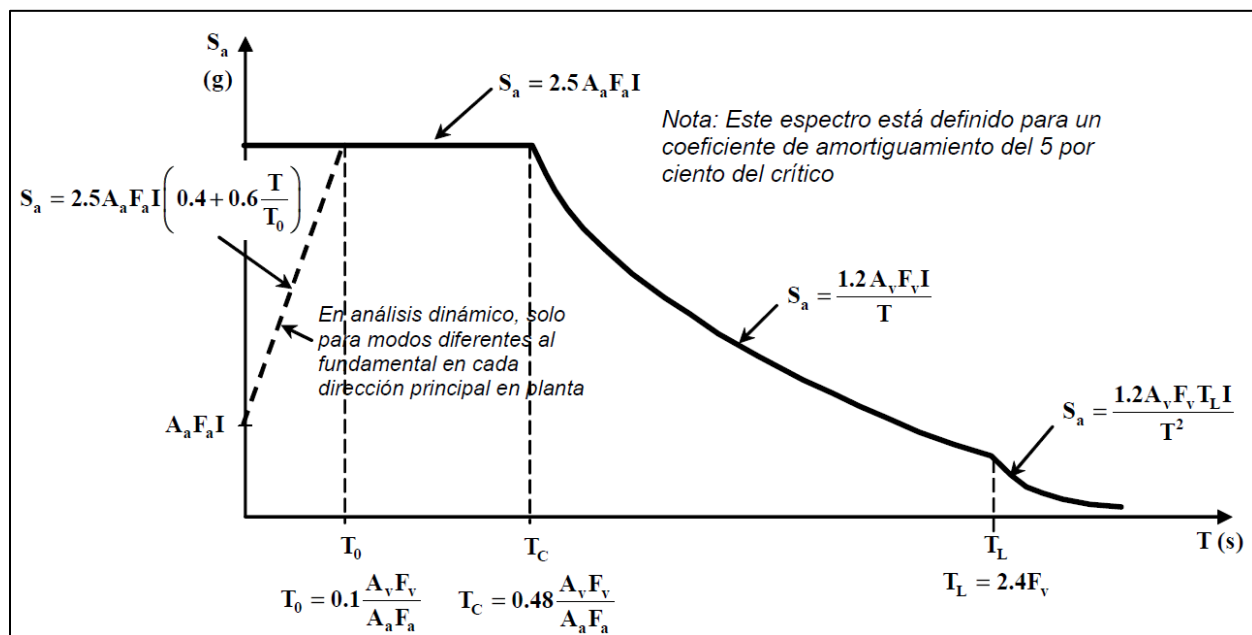
5.3. Métodos de Análisis Dinámico Según Reglamentación Colombiana (NSR-10)

5.3.1. Método de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE).

La NSR-10, Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes 2010, especifica los alineamientos para la ejecución del método de la fuerza horizontal equivalente para el cálculo estimado de las fuerzas sísmicas, junto con el espectro elástico de aceleraciones (S_a), un periodo estimado, la masa de la estructura y su altura. (Sísmica, A. 2010)

Figura 5.3.

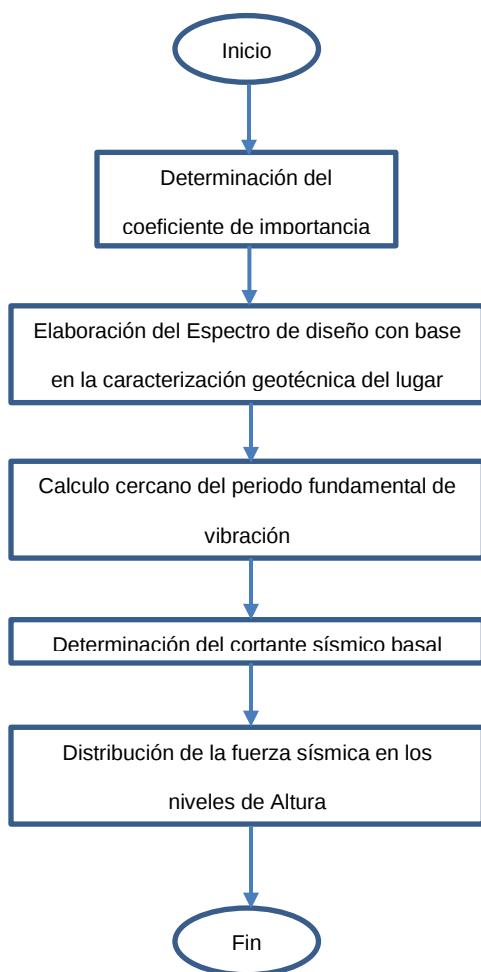
Espectro elástico de aceleraciones como fracción de g.



Fuente: NSR-10.

Debido a que no es un método exacto, este método limita la réplica sísmica al primer modo de vibración, el periodo de vibración fundamental estimado es calculado en base al sistema estructural e iguala la masa real del primer modo a la masa total de la edificación.

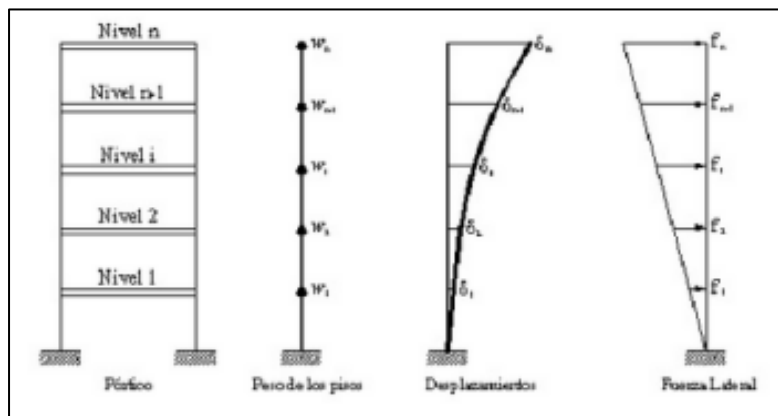
Este método esta dado para llevar a cabo mediante los siguientes pasos:



Con el cálculo del cortante sísmico basal, el cual es un representativo general de efectos inerciales horizontales producidos por fuerzas sísmicas, en sentido de estudio, se tiene una variable invaluable para la especificación de las fuerzas sísmicas. Ya que el coeficiente que analiza la masa y la altura de la estructura debe ser multiplicado por el cortante en la base, siendo el resultado la fuerza sísmica horizontal para cualquier nivel de la edificación (Araque, 2013).

Figura 5.4.

Desplazamientos mediante fuerzas horizontales



Fuente: Araque, (2013)

Con la determinación de las fuerzas sísmicas y derivas de la estructura se establece el periodo fundamental, la cual define que la operación entre el periodo de vibración fundamental y el coeficiente del periodo máximo permisible en la estructura, debe ser menor que el producto de las variables anteriormente mencionadas, lo que dejaría que el diseño sismoresistente cumpla con sus condiciones (Araque, 2013).

El periodo fundamental es un valor cercano inicial lógico del periodo estructural para anticipar las fuerzas a las que estará sometida la edificación con el fin de medir el sistema sismo resistente.

El porcentaje de fuerza determinado para cada nivel, las cuales estimarse por medio de análisis de modelos matemáticos linealmente elástico, que simbolice apropiadamente las características del sistema estructural.

5.3.1.1 Criterios de aplicación del Método de la Fuerza Horizontal

Equivalente.

La NSR-10 en su título A.4.4.1 establece los siguientes criterios mínimos a tener en cuenta:

“(a) Las condiciones de apoyo de la estructura, especialmente cuando se combinen elementos verticales de resistencia sísmica con diferencias apreciables en su rigidez,

(b) El efecto de diafragma, rígido o flexible, de los entrepisos de la edificación, en la distribución del cortante sísmico del piso a los elementos verticales del sistema estructural de resistencia sísmica,

(c) Las variaciones en las fuerzas axiales de los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica causadas por los momentos de vuelco que inducen las fuerzas sísmicas.

(d) Los efectos torsionales prescritos en A.3.6.7.

(e) Los efectos de la dirección de aplicación de la fuerza sísmica prescritos en A.3.6.3.

(f) En estructuras de concreto reforzado y mampostería estructural, a juicio del ingeniero diseñador, consideraciones acerca del grado de figuración de los elementos, compatibles con las fuerzas sísmicas y el grado de capacidad de disipación de energía prescrito para el material estructural.

(g) Deben consultarse lo requisitos de A.3.4.3.”

Estas condiciones deben determinar los desplazamientos horizontales de la edificación, la repartición del cortante en la base, los efectos de las fuerzas sísmicas en la infraestructura y fuerzas internas de la edificación, en base a los requerimientos mínimos demandados por la NSR-10. (Sísmica, A. 2010)

5.3.1.2. Edificaciones óptimas para emplear el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente.

Las situaciones en las cuales el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente puede emplearse, según situaciones analizadas por Rochel en 2006 (Awad, R. 2012), son:

- 1.) Edificaciones irregulares y regulares en zonas de amenaza sísmica baja.
- 2.) Edificaciones irregulares y regulares en zonas de amenaza sísmica intermedia, con grupo de uso I
- 3.) Edificaciones regulares de 60m de altura medidos desde la base o menores a 20 niveles en zona de amenaza sísmica intermedia.
- 4.) Edificaciones irregulares de 18m de altura medidos desde la base que no excedan 6 niveles en zona de amenaza sísmica intermedia.
- 5.) No debe tener cambios drásticos en su rigidez y establecer soportes continuos hasta su cimentación semejantemente distribuidos en planta.
- 6.) En la misma vertical, deben estar ubicados los centros de masa, torsión y de rigidez.

Los análisis dinámicos en las edificaciones, relacionan propiedades y características que pueden ser calculadas mediante el uso de modelos matemáticos estructurales, que

representen su comportamiento, empleando procesos iterativos que inician mediante las fuerzas obtenidas en el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente (FHE). Con los datos obtenidos de la FHE, se establece su periodo de modo fundamental de vibración y su forma modal, los cuales son datos de importancia para calcular los factores de participación modal y el coeficiente de masa efectiva modal, definidos como parámetros indispensables para establecer la respuesta sísmica de una edificación, estos análisis dinámicos son más precisos debido a la incorporación de información que pueden llegar a omitirse con otros métodos (Bazán, E., & Meli, R., 2008).

Éste análisis en particular se encuentra dividido en dos partes:

- Modelos espectrales.
- Análisis cronológicos.

5.3.2.1 Criterios a Tener en Cuenta para Aplicar el Método del Análisis Dinámico Elástico a las edificaciones.

La normativa sismoresistente colombiana NSR-10, brinda alineamientos generales de las edificaciones para que el método pueda emplearse en su análisis, con base en lo anterior, el método es aplicable a:

- Edificaciones mayores a 20 niveles o 60m en su vertical.
- Edificaciones con irregularidades en altura de tipo 1aA, 1bA, 2ª y 3ª, definidos en el título A.3.3.5. de la normativa colombiana sismoresistente NSR-10.
- Edificaciones mayores a 5 niveles o 20m en su vertical, ubicados en zona de amenaza sísmica alta, con combinaciones en su sistema estructural teniendo en cuenta las excepciones definidas en el título A.3.2.4.3. de la normativa colombiana sismoresistente NSR-10.

- Edificaciones irregulares y regulares, localizadas en sitios con suelos D, E o F, con un periodo mayor a $2T_c$.

5.3.2.2 Variables implicadas en el Método de Análisis Dinámico Elástico.

Como primera variable encontramos el número de modos de vibración. Los modos de vibración que aporten significativamente en la respuesta dinámica de la edificación, deben ser incluidos en el análisis. Teniendo en cuenta que la masa es el principal factor de participación en la generación de fuerzas inerciales, se considera adecuado afirmar que, es suficiente cuando las masas modales de los modos pertenecientes al análisis son mayores o iguales al 90% de la masa total de la edificación (Sísmica, A. 2010).

La segunda variable, como en todos los métodos, se calcula un cortante en la base, el cual tiene por nombre Cortante Modal en la Base, la cual se puede determinar con la ecuación descrita en el Título 4.5.4-3 de la normativa sismoresistente colombiana NSR-10. Esta ecuación está en función de los Números de Modos de Vibración, periodo de vibración y valores definidos en el cálculo del espectro elástico de aceleraciones (Sísmica, A. 2010).

5.3.2.3 Fuerza de Diseño en los Elementos.

En la definición de estas fuerzas, se tienen en cuenta las fuerzas sísmicas internas máximas en los elementos (F_s), cumpliendo con los requisitos de la normativa colombiana sismoresistente NSR-10, descritos en el título A.5.5.3. (Sísmica, A. 2010).

6. Materiales y Métodos

La metodología aplicada en esta investigación, se basa en la naturaleza de los datos e información recopilada de tipo cualitativo y cuantitativo, a su vez, por la manipulación de variables, de tipo experimental. Para el desarrollo de esta investigación fue necesario dividir el trabajo por 3 etapas. La primera, describe un proceso inicial numérico para la obtención de la información cuantitativa de las edificaciones de estudio, para la segunda, una corroboración de la información obtenida del paso anterior en más casos de estudios para validar el proceso. Para finalizar la etapa 3, se encarga de corroborar hipótesis y conclusiones iniciales para generar recomendaciones y discusiones acertadas en la finalización de la investigación.

6.1 Caso de estudio: Edificaciones Hipotéticas

Para el desarrollo de las edificaciones a analizar, se han adaptado a la investigación las edificaciones propuestas por la Ingeniera Andrea Chaparro (Chaparro Tarazona et al, 2017), descritas generalmente a continuación:

Tabla 1.

Especificaciones de los casos de estudio.

Edificación	Piso	Vanos	Longitud (m)	Muros	Notas:
1	10	3	5	No	
2	10	3	8	No	
3	10	3	8	Si	2 Muros internos en una dirección.

Fuente: Autor

6.2 Metodología

6.2.1 Etapa 1:

- a.) Elaborar los modelos numéricos de las edificaciones propuestas mediante el software ETABS, estableciendo su geometría, materiales y casos de carga.
- b.) Realizar un análisis modal en función de las frecuencias, periodos y modos de vibración, teniendo en cuenta que son 3 modos por piso según normativa nacional vigente.
- c.) Llevar a cabo un análisis dinámico definiendo la localización de los casos de estudio. Aplicar el método de la Fuerza Horizontal Equivalente y el método de Análisis Dinámico elástico a cada una de las edificaciones planteadas empleando Excel y Etabs.
- d.) Comparar gráficamente los resultados obtenidos en términos de desplazamiento, periodos y cortantes mediante Excel.
- e.) Generar conclusiones iniciales.

6.2.2. Etapa 2:

- a.) Definir un set de casos de estudio más grande para validar resultados y conclusiones de la etapa anterior.
- b.) Identificar el comportamiento dinámico de las edificaciones, realizando análisis estáticos de un solo piso para establecer los parámetros de K_i , K_g y K_s .
- c.) Emplear modelo EBM para el análisis de todos los casos empleando el software Matlab.
- d.) Repetir los pasos b, c y d mencionados en la etapa anterior (Etapa 1).
- e.) Validar y verificar conclusiones.

6.2.3. Etapa 3:

- a.) Generar resultados cualitativos y cuantitativos de las edificaciones de estudio, estableciendo conclusiones y recomendaciones pertinentes.

7. Análisis y Resultados

En el presente capítulo, se definirán las secciones y dimensiones correspondientes a las edificaciones de estudio, junto con los resultados de las modelaciones y comparaciones entre sí para cumplir los pasos descritos en el capítulo anterior.

7.1 Casos de Estudio

Para el desarrollo de la investigación, se usó el 100% de la inercia de la sección bruta de los elementos estructurales, debido a que el objetivo principal, es realizar un análisis modal y verificar así mismo, la distribución de las fuerzas sísmicas de los elementos. Por tanto, las reducciones efectivas de rigidez, para un análisis elástico de segundo orden especificados por la NSR-10, en su título C.10.10.4.1, no son tenidos en cuenta, debido a que esto se realiza para el diseño de los elementos bajo cargas mayoradas y cálculo de deflexiones laterales, lo cual no es objeto de análisis de esta investigación. En los casos de estudio, se tuvieron en cuenta 3 edificaciones regulares hipotéticas en hormigón armado en la ciudad de Tunja, adaptadas de la investigación de la Ingeniera Andrea Chaparro (Chaparro Tarazona, et al, 2017), las cuales se ajustaron específicamente para que cumplieran con los objetivos de la investigación. Las propiedades de los materiales empleados en los casos de estudio, se describirán más adelante en las Tablas 4 y 5. Las edificaciones de estudio tienen las siguientes especificaciones generales detalladas en la Tabla 2.

Tabla 2.

Descripción general de las edificaciones de estudio

Caso	Niveles	Vanos	Longitud (m)	Muros	Ciudad	Amenaza sísmica
1	10	3	5	No	Tunja	Intermedia
2	10	3	8	No	Tunja	Intermedia
3	10	3	8	Si	Tunja	Intermedia

Fuente: Autor

Según las especificaciones anteriores, las edificaciones cumplen con los requisitos definidos en la investigación y condiciones establecidas por la normativa sismoresistente NSR-10, para emplear los métodos de la Fuerza Horizontal Equivalente y Análisis Dinámico Elástico a los casos de estudio.

7.2 Descripción de las estructuras de estudio.

Para las edificaciones, se definió como sistema estructural Pórtico Resistente a Momentos a excepción del caso #3, la cual, al tener presencia de muros, su sistema fue catalogado como sistema combinado. El uso de las edificaciones fue definido como residencial, las cuales al pertenecer al Grupo de Ocupación Normal (I) según la NSR-10 en la tabla A.2.5-1, define su coeficiente de importancia (I), como 1.0.

Las dimensiones de los elementos estructurales y altura de entrepiso estarán definidas por la siguiente tabla:

Tabla 3.

Descripción de los elementos de los casos de estudio

Edificación	Altura de entrepiso (m)	Columnas		Vigas		Espesor de losa (m)
		b(m)	h(m)	b(m)	h(m)	
1	2.8	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5
2	2.8	1.4	1.4	0.5	0.5	0.5
3	2.8	0.6	1.6	0.6	0.6	0.6

Fuente: Autor

Nota: Para la edificación 3, se definió un espesor de muro de 20cm.

7.2.1. Características de los materiales

Los elementos estructurales mencionados en la tabla anterior pertenecientes a los casos de estudio, fueron definidos según características y requisitos de la normativa NSR-10. Las propiedades mecánicas de los materiales se presentarán en las tablas 4 y 5. Los módulos de elasticidad fueron basados en los descritos por la NSR-10, en su Título C, capítulo C.8.5. La densidad del concreto es definida como 23.54 kN/m³.

Tabla 4.

Características mecánicas del concreto empleado en los elementos.

Elemento Estructural	F'c [Mpa]	Módulo de Elasticidad [Mpa]
Viga	28	$4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 24870$
Columna	28	$4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 24870$
Losa de entrepiso	28	$4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 24870$
Muro	28	$4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 24870$

Fuente: NSR-10

Tabla 5.

Características mecánicas del acero de refuerzo empleado en los elementos.

Tipo	Fy [Mpa]	Módulo de Elasticidad [Mpa]
Acero de refuerzo longitudinal	420	200 000
Acero de refuerzo transversal	420	200 000

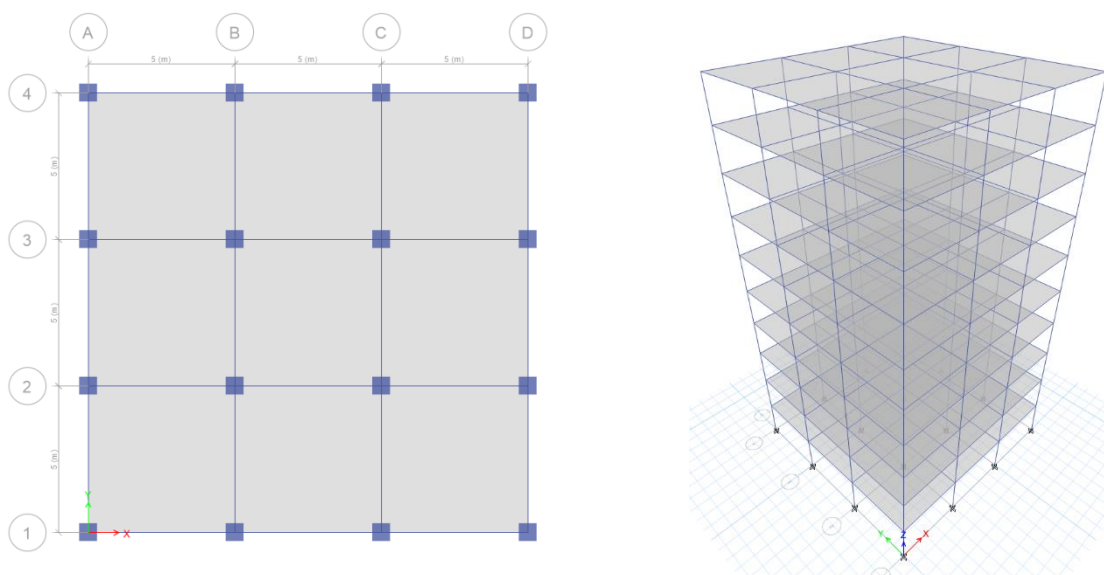
Fuente: NSR-10

7.3. Geometría de las edificaciones de estudio

Las edificaciones planteadas descritas anteriormente en las Tablas 2 y 3, corresponden a edificaciones regulares de 10 pisos y simétricas en su plano horizontal y vertical con una altura de entrepiso de 2.8m. Las edificaciones tienen 3 vanos en cada dirección, modificando la distancia entre luces y adicionando elementos que aporten rigidez al sistema para diferenciar sus comportamientos y cumplir los objetivos planteados como se muestra a continuación en las figura 7.1, 7.2 y 7.3.

Figura 7.1.

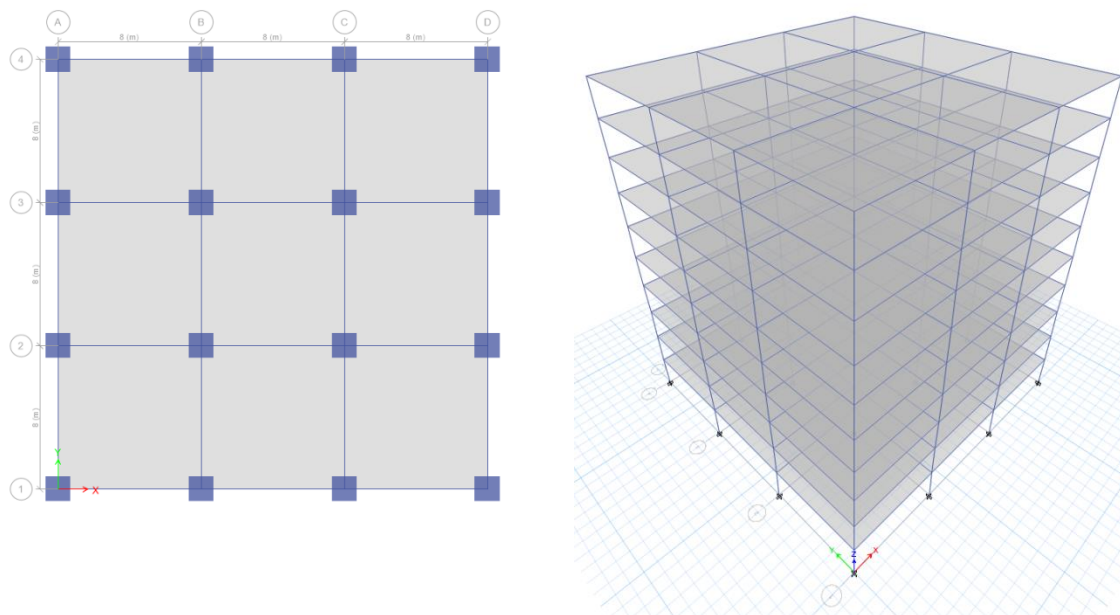
Modelo numérico. Caso de estudio #1



Fuente: Autor

Figura 7.2.

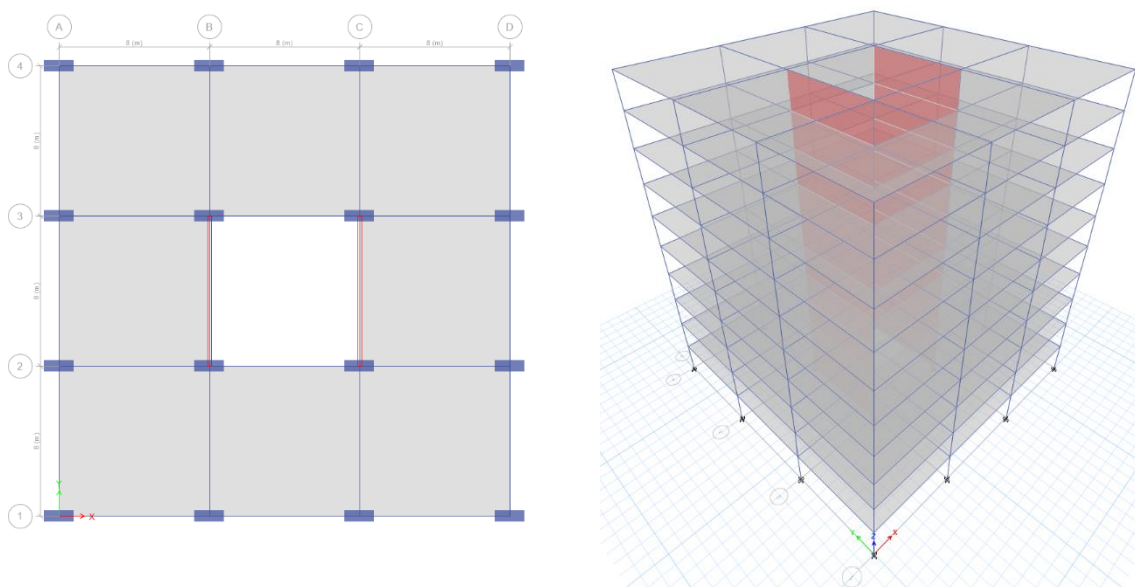
Modelo numérico. Caso de estudio #2



Fuente: Autor

Figura 7.3.

Modelo numérico. Caso de estudio #3.



Fuente: Autor

7.4 Análisis Sísmico

Para el análisis sísmico, se emplearán dos métodos permitidos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 en su numeral A.3-4. Como método de análisis inicial a utilizar, es el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente (A.3.4.2.1), seguido del Método de Análisis Dinámico Elástico (A.3.4.2.2.), cumpliendo con las características geométricas y parámetros de zonificación para la validación de los métodos de análisis.

7.4.1 Ubicación de los casos de estudio

La ubicación de los casos de estudio supuestos corresponde a la Ciudad de Tunja, Boyacá. Según la NSR-10 en su capítulo A.2 define esta zona como región 4, asignando a la ciudad una zona de amenaza sísmica intermedia. Los valores de los Coeficientes de aceleración y velocidad horizontal pico efectiva A_a y A_v , junto a los valores de los coeficientes de ampliación de aceleración en periodos cortos e intermedios F_a y F_v y en función del perfil de suelo elegido arbitrariamente como tipo D, se definen en la tabla 6.

Tabla 6.

Parámetros para el Espectro de Diseño en la ciudad de estudio.

Ciudad	Tunja	
Perfil del Suelo	D	
Amenaza Sísmica	Intermedia	
A_a	0.2	Tabla A.2.3-2 (NSR-10)
A_v	0.2	Tabla A.2.3-2 (NSR-10)
F_a	1.4	Tabla A.2.4-3 (NSR-10)
F_v	2	Tabla A.2.4-4 (NSR-10)

Fuente: NSR-10.

7.4.2 Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño para los casos de estudio.

Con base en los parámetros de la tabla 6, se define el Espectro Elástico de Diseño en función de sus valores de aceleración espectral para un periodo de vibración dado S_a y T tal como se muestra a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7.

Valores de S_a y T .

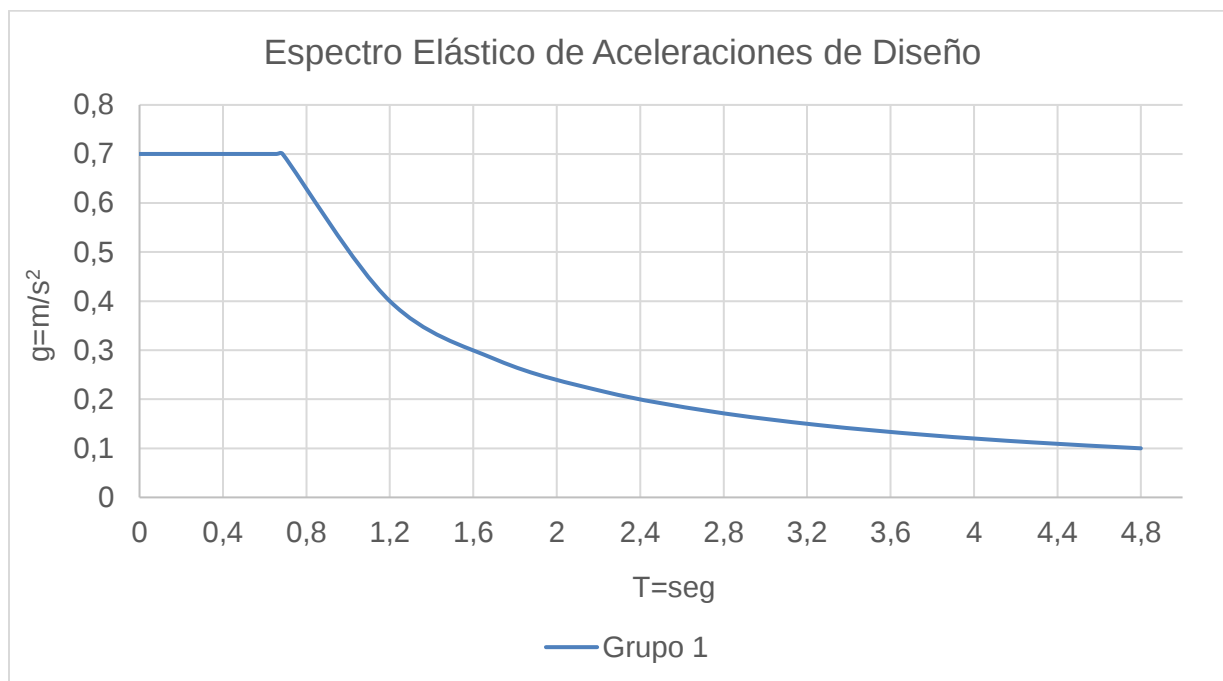
t(s)	Grupo I (S_a)
0.000	0.700
0.143	0.700
0.657	0.700
0.686	0.700
1.200	0.400
1.714	0.280
2.229	0.215
2.743	0.175
3.257	0.147
3.771	0.127
4.286	0.112
4.800	0.100

Fuente: Autor

De acuerdo a los valores de la Tabla 7, se obtiene el siguiente espectro de aceleraciones para el diseño de los casos de estudio:

Figura 7.4.

Espectro de aceleraciones de diseño



Fuente: Autor

Nota: Los casos de estudio tienen las mismas características de zonificación, por tanto, el espectro elástico de diseño aplica para las edificaciones en estudio.

7.4.3 MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

A continuación, se ejecutan los cálculos del Método de la Fuerza Horizontal Equivalente para cada uno de los casos de estudio, según lineamientos definidos por la NSR-10.

7.4.3.1 Evaluación de cargas y masa de las edificaciones.

Para cada una de las edificaciones se realizaron evaluaciones de carga, donde se definieron cargas de entre piso, y de cada uno de los elementos de las estructuras de estudio. Estos valores son presentados en la Tabla N° 8, N°9 y N°10.

Tabla 8.

Evaluación de carga de entrepiso. Caso de estudio #1.

PISO	1.10 KN/m ²	NSR-10 B.3.4
INSTALACIONES	0.10 KN/m ²	NSR-10 B.3.4.1
AFINADO PISO	0.41 KN/m ²	
LOSA SUPERIOR	0.95 KN/m ²	
LOSA INFERIOR	0.00 KN/m ²	
CIELO RASO PAÑETE	0.00 KN/m ²	
VIGUETA	0.79 KN/m ²	
CASETÓN	0.00 KN/m ²	
MUROS DIVISORIOS	3.00 KN/m ²	NSR-10 B.3.4
ΣD	6.35 KN/m²	

Fuente: Autor

Tabla 9.

Evaluación de carga de entrepiso. Caso de estudio #2

PISO	1.10 KN/m ²	NSR-10 B.3.4
INSTALACIONES	0.10 KN/m ²	NSR-10 B.3.4.1
AFINADO PISO	0.41 KN/m ²	
LOSA SUPERIOR	0.95 KN/m ²	
LOSA INFERIOR	0.00 KN/m ²	
CIELO RASO PAÑETE	0.00 KN/m ²	
VIGUETA	0.84 KN/m ²	
CASETÓN	0.00 KN/m ²	
MUROS DIVISORIOS	3.00 KN/m ²	NSR-10 B.3.4
ΣD	6.41 KN/m²	

Fuente: Autor

Tabla 10.**Evaluación de carga de entrepiso. Caso de estudio #3**

PISO	1.10 KN/m²	NSR-10 B.3.4
INSTALACIONES	0.10 KN/m²	NSR-10 B.3.4.1
AFINADO PISO	0.41 KN/m²	
LOSA SUPERIOR	0.95 KN/m²	
LOSA INFERIOR	0.00 KN/m²	
CIELO RASO PAÑETE	0.00 KN/m²	
VIGUETA	1.25 KN/m²	
CASETÓN	0.00 KN/m²	
MUROS DIVISORIOS	3.00 KN/m²	NSR-10 B.3.4
ΣD	6.81 KN/m²	

Fuente: Autor

Como procedimiento del método de la fuerza horizontal, se obtuvieron las masas de las edificaciones de estudio como se muestra en la Tabla N° 11, las cuales incluyen los pesos de entrepiso, columnas y vigas. Los cálculos detallados de los elementos se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 11.

Masas de las edificaciones de estudio

Piso	Edificación #1	Edificación #2	Edificación #3
	Masa Total (Ton)	Masa Total (Ton)	Masa Total (Ton)
CUBIERTA	222.654	596.645	628.055
10	242.004	701.997	645.979
9	242.004	701.997	645.979
8	242.004	701.997	645.979
7	242.004	701.997	645.979
6	242.004	701.997	645.979
5	242.004	701.997	645.979
4	242.004	701.997	645.979
3	242.004	701.997	645.979
2	242.004	701.997	645.979
1	19.350	105.352	62.351
TOTAL	2420.041	7019.971	6504.219

Fuente: Autor.

7.4.3.2 Periodo de Vibración Aproximado de los Edificios

Para el cálculo del periodo fundamental de la edificación, la NSR-10 en su título A.4.2, determina las ecuaciones para la determinación del valor de T, el cual es un estimado inicial justo para determinar las posibles fuerzas sísmicas a las que puede estar sometida la estructura. Para ello, se inicia el cálculo el periodo fundamental aproximado T_a (A.4.2-3), definido por la siguiente expresión:

$$[7.1] T_a = C_t h^\alpha$$

Los valores de C_t y α están definidos en la NSR-10 en su la tabla A.4.2-1, mientras que h es constante para todos los casos de estudio por no tener variación en su altura. Los valores mencionados anteriormente para los casos de estudio, se encuentran definidos en la tabla 12.

Tabla 12. Valores de C_t y α . Casos de Estudio.

Caso de Estudio	Sistema Estructural de Resistencia Sísmica	C_t	α
Edificación #1	Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resiste la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9
Edificación #2	Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resiste la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9
Edificación #3	Todos los otros sistemas estructurales basados en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería.	0.049	0.75

Fuente: NSR-10.

La siguiente variable a utilizar para el cálculo del periodo fundamental aproximado es C_u , el cual no debe ser menor que 1.2 y el periodo estimado no puede ser mayor que el producto de $C_u T_a$. Este valor puede ser determinado mediante la ecuación definida en el título A.4.2-2 de la NSR-10 descrita a continuación.

$$[7.2] C_u = 1.75 - 1.2 A_v F_v$$

Los valores de $C_u T_a$ calculados para los casos de estudio, se definen a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13.**Valores de Periodos Fundamental aproximado. Casos de estudio.**

Caso de Estudio	C_t	α	T_a (s)	C_u	C_uT_a (s)
Edificación #1	0.047	0.9	0.943	1.27	1.20
Edificación #2	0.047	0.9	0.943	1.27	1.20
Edificación #3	0.049	0.75	0.596	1.27	0.76

Fuente: Autor.**7.4.3.3 Cálculo de Sa**

Para periodos de vibraciones mayores que el calculado para T_c, el valor de Sa puede ser definido mediante la figura A.2.6-1 de la NSR-10 descrita de la siguiente forma:

$$[7.3]Sa = \frac{1.2A_v F_v I}{T}$$

Con base en la ecuación anterior, los valores calculados para Sa de cada uno de los casos de estudio los encontramos en a continuación en la Tabla 14

Tabla 14.**Valores de Sa. Casos de estudio**

Caso de Estudio	S_{ax} (g)	S_{ay} (g)
Edificación #1	0.52	0.52
Edificación #2	0.48	0.48
Edificación #3	0.63	0.94

Fuente: Autor

7.4.3.4 Cortante Sísmico en la base

Para el cálculo del cortante sísmico basal, se utiliza la ecuación A.4.3-1 en función de S_a , la masa y la gravedad.

$$[7.4] V_s = S_a g M$$

Tabla 15.

Valores de Cortante Basal. Casos de Estudio.

Caso de Estudio	Vs _{bx} (kN)	Vs _{by} (kN)
Edificación #1	12287.3614	12287.3614
Edificación #2	32237.190	32237.190
Edificación #3	40045.5017	59477.3879

Fuente: Autor.

7.4.3.5 Cálculo de la Fuerza Horizontal Equivalente

Las fuerzas horizontales y cortantes para cada piso según la NSR-10, deben ser calculados mediante las siguientes ecuaciones.

$$[7.5] F_x = C_{vx} V_s \quad (A.4.3-2)$$

$$[7.6] C_{vx} = \frac{m_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i h_i^k)} \quad (A.4.3-3)$$

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta la estimación del factor K , el cual es un exponente relacionado con el periodo fundamental de la edificación, para elegirlo debe tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Para T menor o igual a 0.5 segundos, $k=1.0$.
- b) Para T entre 0.5 y 2.5 segundos, $k= 0.75 + 0.5T$
- c) Para T mayor que 2.5 segundos, $k=2.0$

Tabla 16.

Valores de k. Casos de Estudio.

Caso de Estudio	Tx(s)	Ty(s)	kx	ky
Edificación #1	0.92	0.92	1.21	1.21
Edificación #2	1.01	1.01	1.26	1.26
Edificación #3	0.757	0.51	1.13	1.01

Fuente: Autor.

Tabla 17.

Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso. Caso 1.

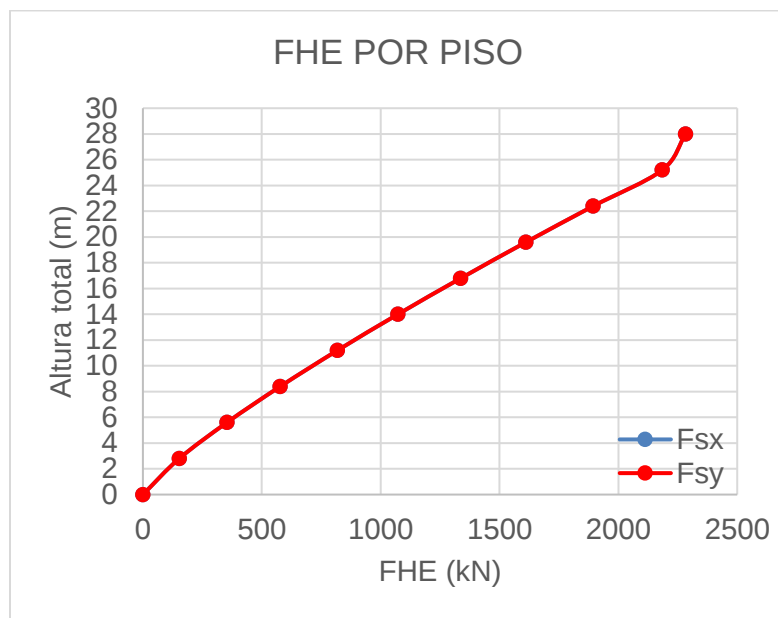
Piso	H Total (m)	m (Ton)	m*hk ^x	Cvx	Fsx(kN)	Vsx Piso (kN)
Cubierta	2.8	222.654	12551.375	0.186	2283.026	2283.026
10	2.8	242.004	12009.291	0.178	2184.424	4467.451
9	2.8	242.004	10414.126	0.154	1894.273	6361.723
8	2.8	242.004	8860.385	0.131	1611.655	7973.379
7	2.8	242.004	7352.702	0.109	1337.416	9310.795
6	2.8	242.004	5897.089	0.087	1072.648	10383.443
5	2.8	242.004	4501.700	0.067	818.835	11202.278
4	2.8	242.004	3178.342	0.047	578.123	11780.401
3	2.8	242.004	1945.944	0.029	353.956	12134.357
2	2.8	242.004	841.170	0.012	153.004	12287.361
Total	28	2400.691	67552.124	1.000	12287.361	

Fuente: Autor.

Nota: El valor de las Fuerzas Horizontales Equivalentes y Cortantes por piso, coincide para ambas direcciones.

Figura 7.5.

Distribución de fuerzas en X y Y de la estructura por FHE. Caso 1



Fuente: Autor

Tabla 18.

Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso. Caso 2.

Piso	H Total (m)	m (Ton)	$m \cdot h k^x$	C_{vx}	$F_{sx}(kN)$	V_{sx} Piso (kN)
Cubierta	28	596.645	39075.061	0.177	5717.358	5717.358
10	25.2	701.997	40280.330	0.183	5893.710	11611.067
9	22.4	701.997	34745.343	0.158	5083.845	16694.913
8	19.6	701.997	29384.392	0.133	4299.445	20994.358
7	16.8	701.997	24215.782	0.110	3543.188	24537.546
6	14	701.997	19263.093	0.087	2818.524	27356.070
5	11.2	701.997	14558.075	0.066	2130.098	29486.168
4	8.4	701.997	10146.257	0.046	1484.573	30970.741
3	5.6	701.997	6099.740	0.028	892.498	31863.239
2	2.8	701.997	2555.752	0.012	373.951	32237.190
Total	28	6317.974	220323.826	1.000	32237.190	

Fuente: Autor.

Nota: El valor de las Fuerzas Horizontales Equivalentes y Cortantes por piso, coincide para ambas direcciones.

Figura 7.6.

Distribución de fuerzas en X y Y de la estructura por FHE. Caso 2.



Fuente: Autor

Tabla 19.

Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso eje x. Caso 3.

Piso	H Total (m)	m (Ton)	m*hk ^x	Cvx	Fsx(kN)	Vsx Piso (kN)
Cubierta	28	628.055	27005.951	0.18789235	7524.243463	7524.243463
10	25.2	645.979	24662.204	0.17158587	6871.242073	14395.48554
9	22.4	645.979	21592.062	0.15022553	6015.856632	20411.34217
8	19.6	645.979	18571.049	0.129207	5174.159252	25585.50142
7	16.8	645.979	15605.262	0.10857272	4347.848855	29933.35027
6	14	645.979	12702.706	0.08837834	3539.155096	33472.50537
5	11.2	645.979	9874.390	0.0687005	2751.145931	36223.6513
4	8.4	645.979	7136.532	0.04965201	1988.339719	38211.99102
3	5.6	645.979	4515.714	0.03141782	1258.142339	39470.13336
2	2.8	645.979	2065.107	0.01436786	575.3682954	40045.50165
Total	28	5813.813	143730.977	1	40045.50165	

Fuente: Autor.

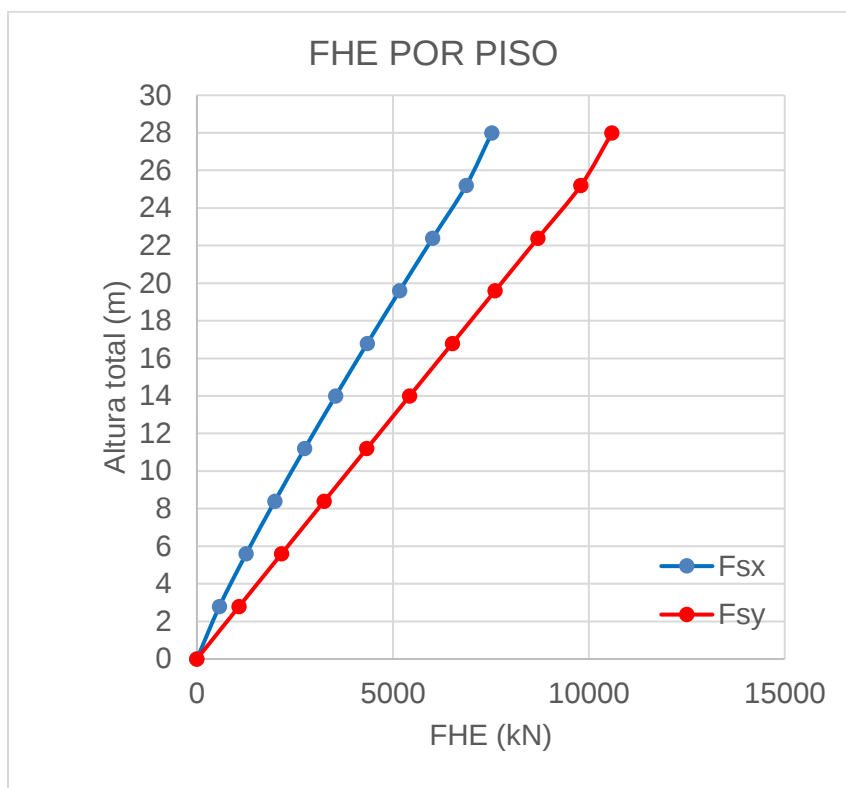
Tabla 20.

Valores de Fuerza Horizontales Equivalentes y cortante por piso eje Y. Caso 3.

Piso	H Total (m)	m (Ton)	m*hk _y	Cvy	Fsy(kN)	Vsy Piso (kN)
Cubierta	28	628.055	17880.997	0.178068262	10591.0351	10591.03507
10	25.2	645.979	16543.449	0.164748264	9798.7964	20389.83147
9	22.4	645.979	14696.631	0.146356684	8704.91328	29094.74474
8	19.6	645.979	12850.969	0.127976626	7611.7154	36706.46015
7	16.8	645.979	11006.630	0.109609736	6519.30078	43225.76093
6	14	645.979	9163.834	0.091258217	5427.80037	48653.5613
5	11.2	645.979	7322.892	0.072925164	4337.39828	52990.95958
4	8.4	645.979	5484.275	0.054615258	3248.37286	56239.33243
3	5.6	645.979	3648.778	0.036336431	2161.19601	58400.52845
2	2.8	645.979	1818.077	0.018105358	1076.85942	59477.38787
Total	28	5813.813	100416.532	1	59477.3879	

Fuente: Autor.

Figura 7.7. Distribución de fuerzas en X y Y de la estructura por FHE. Caso 3.



Fuente: Autor

7.4.5 Coeficiente de disipación de energía, R.

A lo que se refiere a la elección del coeficiente de capacidad de energía, R, los casos de estudio son edificaciones completamente simétricas, tanto en su plano horizontal como vertical, por tanto, esto evitaría la presentación de torsión el cual no es objeto de estudio de esta investigación. Con base en lo anterior, no se presentaría irregularidad en planta ni en altura, dejando como valor de 1.0 el coeficiente por ausencia de redundancia estructural, especificado en el título A.3.3 de la NSR-10.

Para esta investigación, el valor de R es igual al coeficiente de disipación R_0 , debido a las particularidades mencionadas anteriormente, por consiguiente, los valores tomados de R para los casos de estudio son los siguientes:

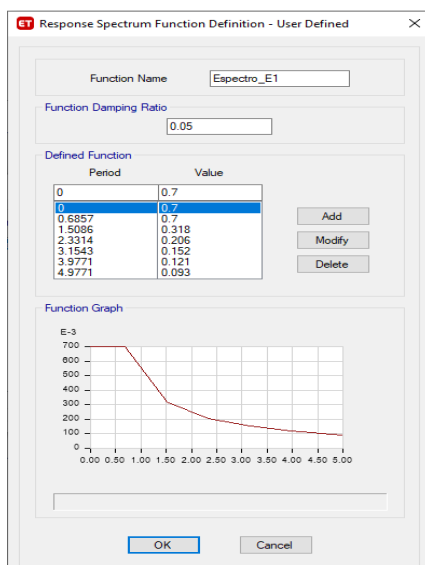
Tabla 21.**Valores de R. Casos de estudio.**

NSR-10. A.3.-TABLA A.3-3. Y TABLA A.3-2	
Disipación de energía	R
D.M.I	2.5
D.M.O	5
D.E.S	7

Fuente: NSR-10.**7.4.4 Método Del Análisis Dinámico Elástico**

Para la implementación del método, se define el espectro elástico de diseño para los casos de estudio con la ayuda de un modelo numérico mediante Etabs, juntos con los alineamientos establecidos por la NSR-10. Teniendo en cuenta que el cortante dinámico es inferior al hallado mediante la Fuerza Horizontal Equivalente, la norma en su Título A.5.4 especifica que, para estructuras regulares el cortante basal dinámico no puede ser menor que un 80%, del obtenido por la fuerza horizontal equivalente y un 90% para edificaciones irregulares. Al no cumplir las condiciones anteriores, la norma exige multiplicar estos valores por un factor de amplificación para ajustar los resultados.

Figura 7.8.
Definición de Espectro Elástico de Diseño. Casos de estudio.



Fuente: Etabs.

7.4.4.1 Modos de vibración y participación de masa de los casos de estudio.

Teniendo en cuenta, que la norma exige 3 modos de vibración por cada piso de estudio, según el título A.5.4.2 de la norma, menciona que deben incluirse los modos de vibración hasta que la masa del edificio tenga una participación mínima del 90%

Tabla 22.

Modos de vibración y participación de masa. Caso 1.

Modo	Periodo (seg)	UX	UY	Sum UX	Sum UY
1	0.919	0.0106	0.7888	0.0106	0.7888
2	0.919	0.7884	0.0106	0.799	0.7994
3	0.781	0.0001	0.0001	0.7991	0.7995
4	0.293	0	0.1031	0.7991	0.9026
5	0.293	0.1036	0	0.9027	0.9026
6	0.251	0	3.20E-06	0.9027	0.9026
7	0.162	0.0393	0	0.942	0.9026
8	0.162	0	0.0392	0.942	0.9418
9	0.141	1.42E-06	0	0.942	0.9418
10	0.106	2.35E-05	0.022	0.942	0.9638
11	0.106	0.0217	2.40E-05	0.9638	0.9639
12	0.093	1.98E-06	0	0.9638	0.9639
13	0.075	0	0.0139	0.9638	0.9778
14	0.075	0.014	0	0.9777	0.9778
15	0.066	0	8.58E-07	0.9777	0.9778
16	0.056	0.0095	0	0.9872	0.9778
17	0.056	0	0.0094	0.9872	0.9871
18	0.05	0	0	0.9872	0.9871
19	0.044	0.0063	0	0.9935	0.9871
20	0.044	0	0.0063	0.9935	0.9935
21	0.039	0	0	0.9935	0.9935
22	0.036	0	0.004	0.9935	0.9974
23	0.036	0.004	0	0.9974	0.9974
24	0.032	0	0	0.9974	0.9974
25	0.031	0.002	0	0.9994	0.9974
26	0.031	0	0.002	0.9994	0.9994
27	0.028	0.0006	2.60E-06	1	0.9994
28	0.028	2.61E-06	0.0006	1	1
29	0.027	0	0	1	1
30	0.025	0	0	1	1

Fuente: Etabs.

Tabla 23.

Modos de vibración y participación de masa. Caso 2.

Modo	Periodo (seg)	UX	UY	Sum UX	Sum UY
1	1.016	0	0.7053	0	0.7053
2	1.016	0.7053	0	0.7053	0.7053
3	0.824	0	0	0.7053	0.7053
4	0.25	0.1525	2.02E-05	0.8577	0.7053
5	0.25	2.02E-05	0.1525	0.8578	0.8578
6	0.214	0	0	0.8578	0.8578
7	0.103	0.0001	0.0624	0.8579	0.9202
8	0.103	0.0624	0.0001	0.9203	0.9203
9	0.091	0	0	0.9203	0.9203
10	0.055	4.68E-05	0.0329	0.9203	0.9532
11	0.055	0.0329	4.68E-05	0.9532	0.9532
12	0.05	0	0	0.9532	0.9532
13	0.035	0.0167	0.0029	0.9699	0.9561
14	0.035	0.0029	0.0167	0.9728	0.9728
15	0.031	0	0	0.9728	0.9728
16	0.024	0.0033	0.009	0.9761	0.9818
17	0.024	0.009	0.0033	0.9851	0.9851
18	0.022	0	0	0.9851	0.9851
19	0.018	1.06E-05	0.0077	0.9851	0.9928
20	0.018	0.0077	1.06E-05	0.9928	0.9928
21	0.016	0	0	0.9928	0.9928
22	0.014	0.0009	0.0036	0.9937	0.9964
23	0.014	0.0036	0.0009	0.9973	0.9973
24	0.013	0	0	0.9973	0.9973
25	0.012	0.0012	0.0009	0.9985	0.9982
26	0.012	0.0009	0.0012	0.9994	0.9994
27	0.011	0	0	0.9994	0.9994
28	0.011	0.0001	0.0004	0.9996	0.9999
29	0.011	0.0004	0.0001	1	1
30	0.01	0	0	1	1

Fuente: Etabs.

Tabla 24.

Modos de vibración y participación de masa. Caso 3.

Modo	Periodo (seg)	UX	UY	Sum UX	Sum UY
1	0.82	0.7496	0	0.7496	0
2	0.71	0	0	0.7496	0
3	0.508	0	0.7189	0.7496	0.7189
4	0.233	0.1232	0	0.8728	0.7189
5	0.206	0	0	0.8728	0.7189
6	0.135	0	0.1882	0.8728	0.907
7	0.11	0.0543	0	0.927	0.907
8	0.102	0	0	0.927	0.907
9	0.067	0	0.0482	0.927	0.9552
10	0.063	0.03	0	0.9571	0.9552
11	0.062	0	0	0.9571	0.9552
12	0.045	0	0.0204	0.9571	0.9756
13	0.042	0	0	0.9571	0.9756
14	0.041	0.0182	0	0.9753	0.9756
15	0.034	0	0.0105	0.9753	0.9861
16	0.031	0	0	0.9753	0.9861
17	0.029	0.0114	0	0.9867	0.9861
18	0.028	0	0.0062	0.9867	0.9923
19	0.024	0	0	0.9867	0.9923
20	0.024	0	0.0038	0.9867	0.9961
21	0.022	0.007	0	0.9937	0.9961
22	0.021	0	0.0023	0.9937	0.9985
23	0.02	0	0	0.9937	0.9985
24	0.019	0	0.0012	0.9937	0.9997
25	0.018	0.004	0	0.9977	0.9997
26	0.017	0	0.0003	0.9977	1
27	0.017	0	0	0.9977	1
28	0.016	0.0018	0	0.9995	1
29	0.015	0	0	0.9995	1
30	0.014	0.0005	0	1	1

Fuente: Etabs.

Como evidenció la información anterior, en las Tablas 22, 23 y 24 de los casos de estudio, se incluyeron los modos de vibración suficientes en la que, la participación de masa de las edificaciones fue de un 100%.

7.5 Comparación Entre el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente y el Método de Análisis Dinámico Elástico.

A continuación, se analizaron los desplazamientos y periodos de vibración entre las edificaciones de estudio, los cuales pueden ser tomado como un indicativo inicial del comportamiento dinámico que gobierna la edificación.

Tabla 25.

Modos de Vibración. Casos de Estudio.

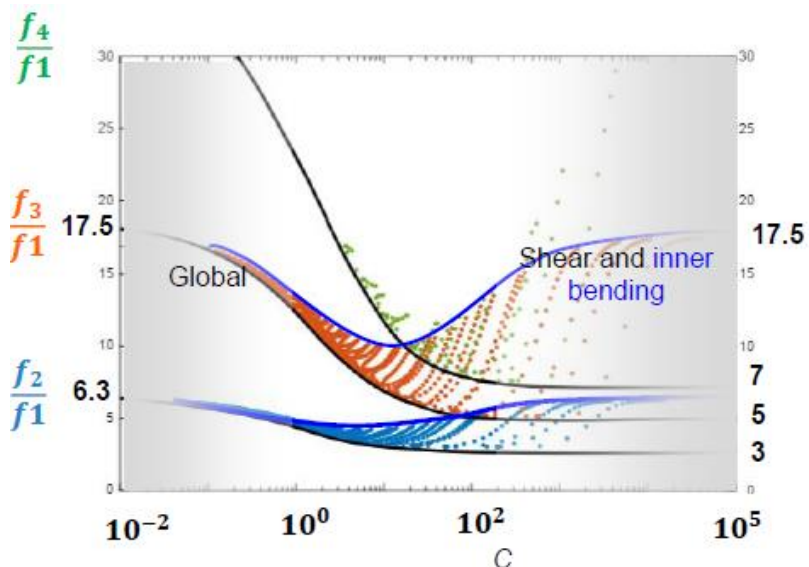
Edificación	Periodos de Vibración en (x)			Periodos de Vibración en (y)		
	Modo 1 T(s)	Modo 2 (Ts)	Modo 3 T(s)	Modo 1 T(s)	Modo 2 (Ts)	Modo 3 T(s)
#1	0.920	0.292	0.162	0.920	0.292	0.161
#2	1.010	0.249	0.103	1.010	0.249	0.103
#3	0.82	0.23	0.11	0.51	0.135	0.07

Fuente: Autor.

Para este análisis, se tuvieron en cuenta 3 modos de vibración en cada dirección. Posteriormente, se grafican cada uno de los desplazamientos de los modos seleccionados y con base en su razón de frecuencia, se pueden observar comportamientos característicos de edificaciones con un comportamiento dinámico pilotado por la combinación de mecanismo(s) de cortante, flexión global y/o flexión interna.

Figura 7.9.

Mecanismos dinámicos en función de sus razones de frecuencia.



Fuente: (Franco Ariza, 2021)

Tabla 26.

Razones de frecuencia. Casos de estudio

Edificación	Razón de frecuencia en (X)			Razón de frecuencia en (Y)		
	f1/f1	f2/f1	f3/f1	f1/f1	f2/f1	f3/f1
#1	1.00	3.15	5.68	1.00	3.15	5.71
#2	1.00	4.06	9.81	1.00	4.06	9.81
#3	1.00	3.57	7.45	1.00	3.78	7.29

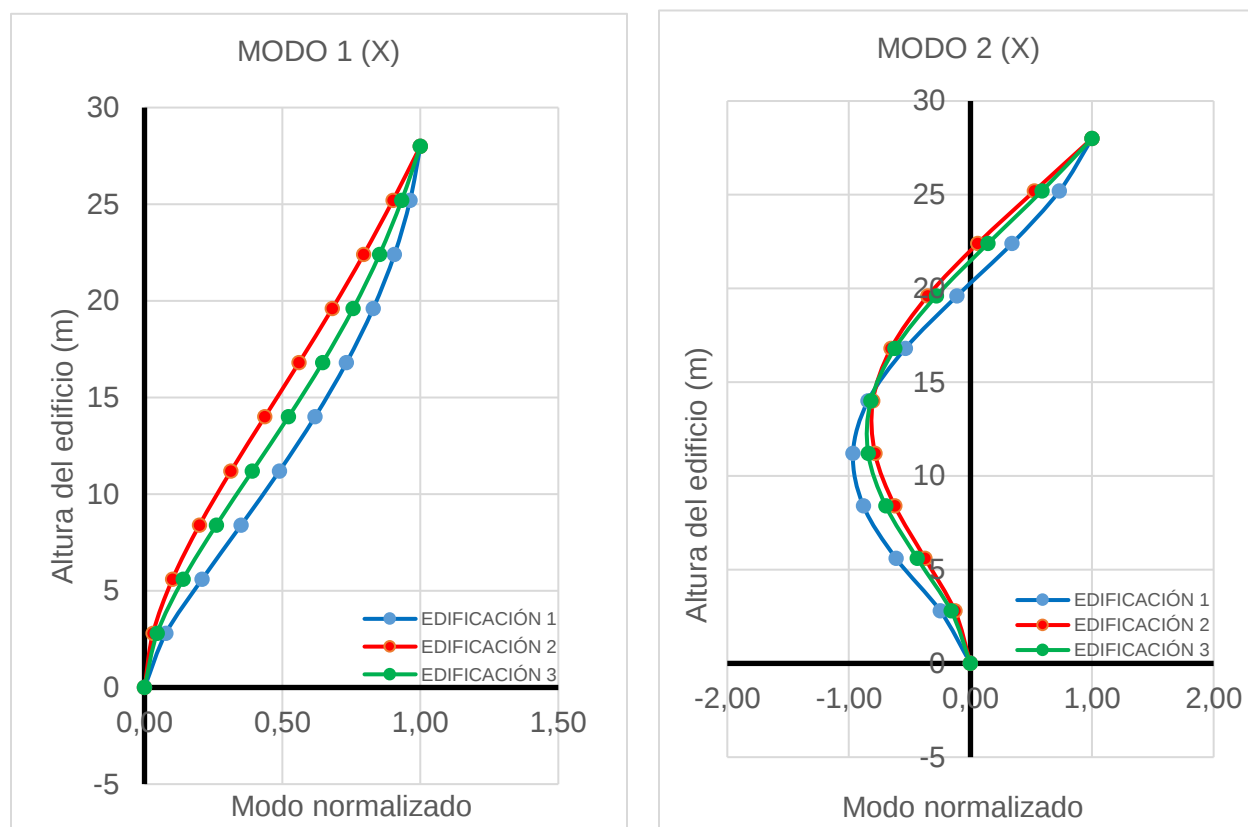
Fuente: Autor

Con base en la información presentada en la Figura 7.9 y Tabla 26, se puede predefinir el comportamiento dinámico de la edificación comparando las frecuencias de los modos de vibración 1, 2 y 3, con los valores definidos para cada mecanismo en la ilustración. Estas frecuencias fueron halladas con base en los periodos determinados mediante un análisis dinámico modal, en la que se halló la frecuencia 1 (f_1), con la formula básica de frecuencia definida como $1/T$. Las razones de frecuencia, se obtienen en función de la frecuencia inicial,

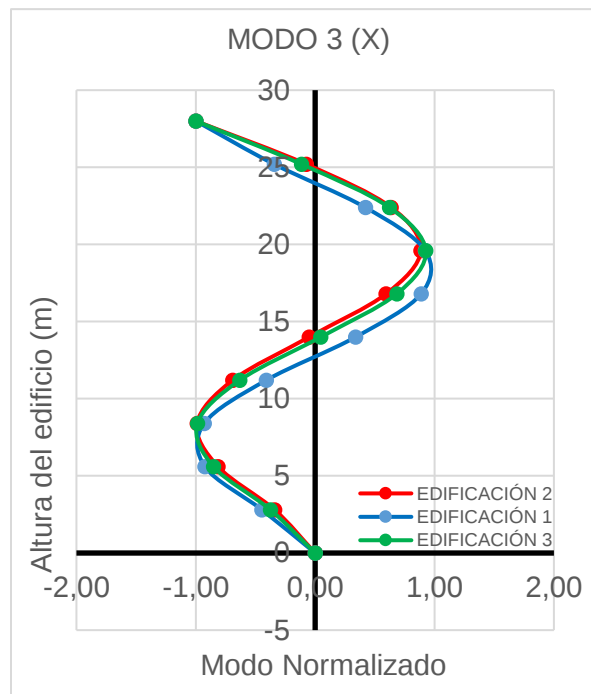
donde f_1 es dividido por sí misma, f_2 es dividido por f_1 y f_3 es dividido por f_1 , tal como se mencionó anteriormente. Las regiones comprendidas en los intervalos 3, 5 y 7, son características de edificaciones con comportamiento a cortante, mientras que los comprendidos entre 6.3 y 17.5 son comportamientos típicos de edificaciones a flexión. Por tanto, la clasificación de la edificación 1, se asocia con un comportamiento de una viga a cortante, mientras que las edificaciones 2 y 3 combina los mecanismos de flexión interna y cortante. Las figuras 7.10, 7.11, 7.12 y 7.13, describen el comportamiento de las edificaciones en los modos de vibración para las direcciones transversales y longitudinales.

Figura 7.10.

Desplazamientos en X según modos Normalizados. Casos de estudio.



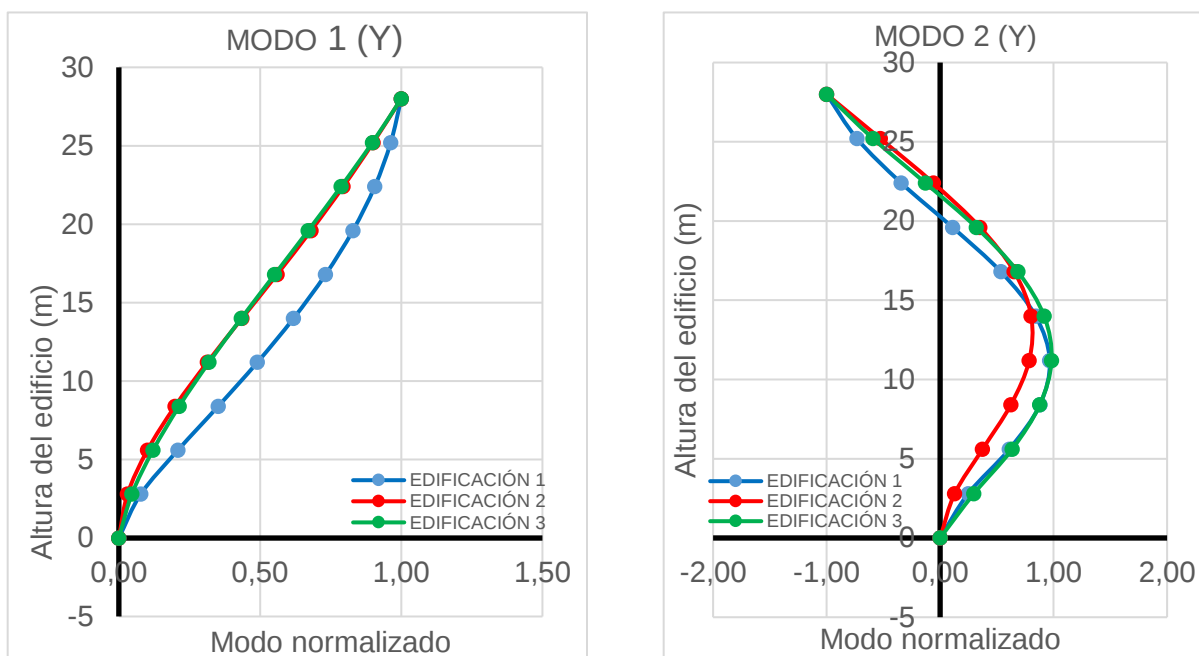
Fuente: Autor.

Figura 7.11.**Desplazamientos en X según modos Normalizados. Casos de estudio.****Fuente: Autor**

En las figuras presentados en la Figura 7.10 y 7.11, representan los desplazamientos presentados en los modos de vibración seleccionados en el eje X. Donde la línea azul describe el comportamiento del caso 1, la línea roja describe el caso 2 y la línea verde el caso 3.

Figura 7.12.

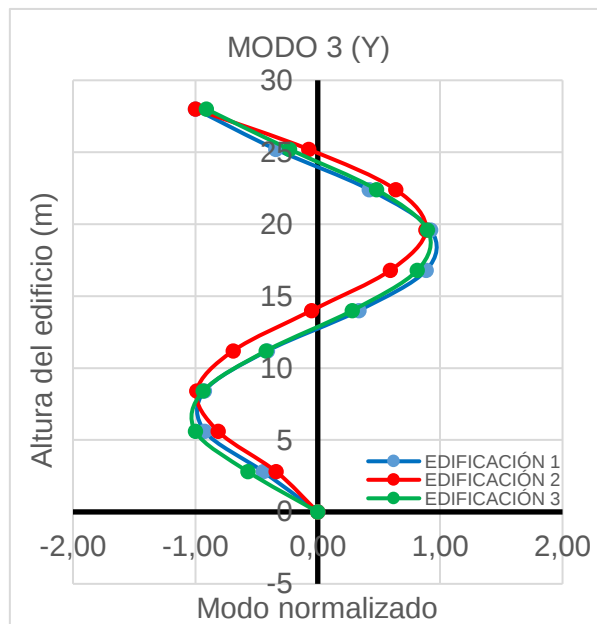
Desplazamientos en Y según modos Normalizados. Casos de estudio.



Fuente: Autor.

Figura 7.13.

Desplazamientos en Y según modos Normalizados. Casos de estudio



Fuente: Autor

En las figuras 7.12 y 7.13 anteriores, se presentan los desplazamientos presentados en los modos de vibración seleccionados en el eje Y. Donde la línea azul describe el comportamiento del caso 1, la línea roja describe el caso 2 y la línea verde el caso 3.

7.5.1 Evaluación de Cortantes estáticos y Dinámicos (Fuerza Horizontal Equivalente y Análisis Dinámico Elástico)

Los cortantes hallados mediante el método de la Fuerza Horizontal Equivalente son mayores que los considerados mediante el método del Análisis Dinámico Elástico. Teniendo en cuenta que la norma ya contempla esta posibilidad, se realiza el cálculo de error relativo para cuantificar la diferencia entre los cortantes de los casos de estudio, debido que, para el objetivo de la investigación, no es relevante realizar el reajuste de cortantes según lineamientos del título A.5.4 de la NRS-10.

Tabla 27.

Cortantes Estáticos y Dinámicos. Caso 1.

ERROR RELATIVO ENTRE CORTANTES ESTÁTICOS Y DINAMICOS							
PISO	ALTURA	FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE		ANALISIS DINAMICO ELASTICO		Error Relativo V_{sx} (%)	Error Relativo V_{sy} (%)
		V_{sx} (kN)	V_{sy} (kN)	V_{sx} (kN)	V_{sy}(kN)		
28	CUBIERTA	0	0	0	0	0.00	0.00
25.2	10	2283.026	2283.026	1903.371	1902.541	19.95	20.00
22.4	9	4467.451	4467.451	3717.049	3715.347	20.19	20.24
19.6	8	6361.723	6361.723	5338.622	5336.514	19.16	19.21
16.8	7	7973.379	7973.379	6776.578	6774.670	17.66	17.69
14	6	9310.795	9310.795	8035.535	8033.823	15.87	15.89
11.2	5	10383.443	10383.443	9114.395	9113.142	13.92	13.94
8.4	4	11202.278	11202.278	10004.079	10004.826	11.98	11.97
5.6	3	11780.401	11780.401	10684.738	10687.533	10.25	10.23
2.8	2	12134.357	12134.357	11130.946	11133.700	9.01	8.99
0	1	12287.361	12287.361	11322.597	11325.193	8.52	8.50

Fuente: Autor.

Tabla 28.

Cortantes Estáticos y Dinámicos. Caso 2.

ERROR RELATIVO ENTRE CORTANTES ESTÁTICOS Y DINAMICOS							
PISO	ALTURA	FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE		ANALISIS DINAMICO ELASTICO		Error Relativo Vsx (%)	Error Relativo Vsy (%)
		Vsx (kN)	Vsy (kN)	Vsx (kN)	Vsy(kN)		
28	CUBIERTA	0	0	0	0	0	0
25.2	10	5717.358	5717.358	5431.527	5431.527	5.26	5.26
22.4	9	11611.067	11611.067	10195.246	10195.246	13.89	13.89
19.6	8	16694.913	16694.913	14047.101	14047.101	18.85	18.85
16.8	7	20994.358	20994.358	17257.271	17257.271	21.66	21.66
14	6	24537.546	24537.546	19961.449	19961.449	22.92	22.92
11.2	5	27356.070	27356.070	22221.068	22221.068	23.11	23.11
8.4	4	29486.168	29486.168	24048.222	24048.222	22.61	22.61
5.6	3	30970.741	30970.741	25421.473	25421.473	21.83	21.83
2.8	2	31863.239	31863.239	26304.802	26304.802	21.13	21.13
0	1	32237.190	32237.190	26683.973	26683.973	20.81	20.81

Fuente: Autor

Tabla 29.

Cortantes Estáticos y Dinámicos. Caso 3.

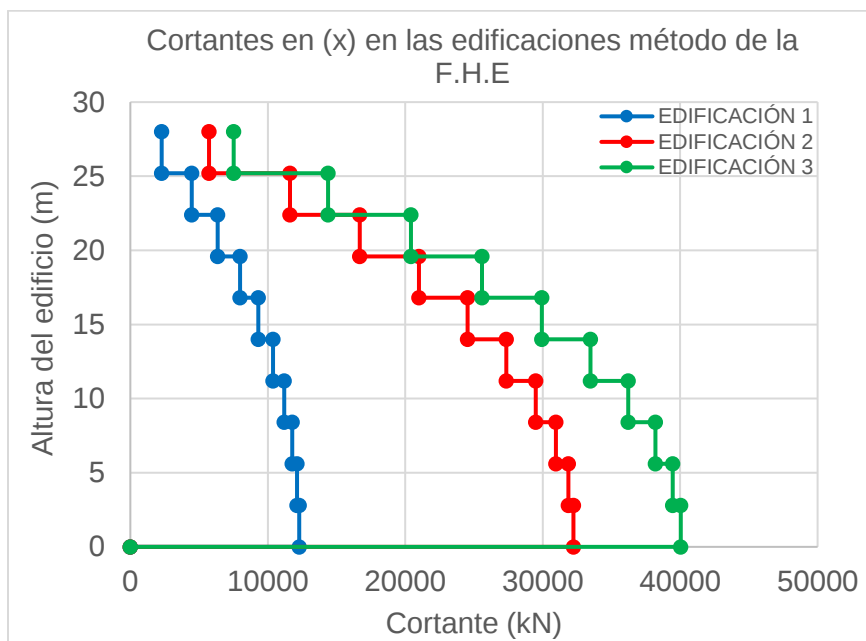
ERROR RELATIVO ENTRE CORTANTES ESTÁTICOS Y DINAMICOS							
PISO	ALTURA	FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE		ANALISIS DINAMICO ELASTICO		Error Relativo Vsx	Error Relativo Vsy
		Vsx (kN)	Vsy (kN)	Vsx (kN)	Vsy(kN)		
28	CUBIERTA	0	0	0	0	0	0
25.2	10	7524.243	10591.035	6050.295	6800.274	19.59	35.79
22.4	9	14395.486	20389.831	11278.817	12733.265	21.65	37.55
19.6	8	20411.342	29094.745	15822.116	17619.504	22.48	39.44
16.8	7	25585.501	36706.460	19779.425	21656.623	22.69	41.00
14	6	29933.350	43225.761	23174.278	25001.012	22.58	42.16
11.2	5	33472.505	48653.561	26000.197	27759.028	22.32	42.95
8.4	4	36223.651	52990.960	28236.413	29986.330	22.05	43.41
5.6	3	38211.991	56239.332	29858.830	31693.425	21.86	43.65
2.8	2	39470.133	58400.528	30856.183	32857.839	21.82	43.74
0	1	40045.502	59477.388	31263.111	33420.242	21.93	43.81

Fuente: Autor.

Para un análisis más completo, se graficaron cada uno de los cortantes y errores hallados para cada caso de estudio, tanto de la F.H.E. como del Análisis Dinámico Elástico.

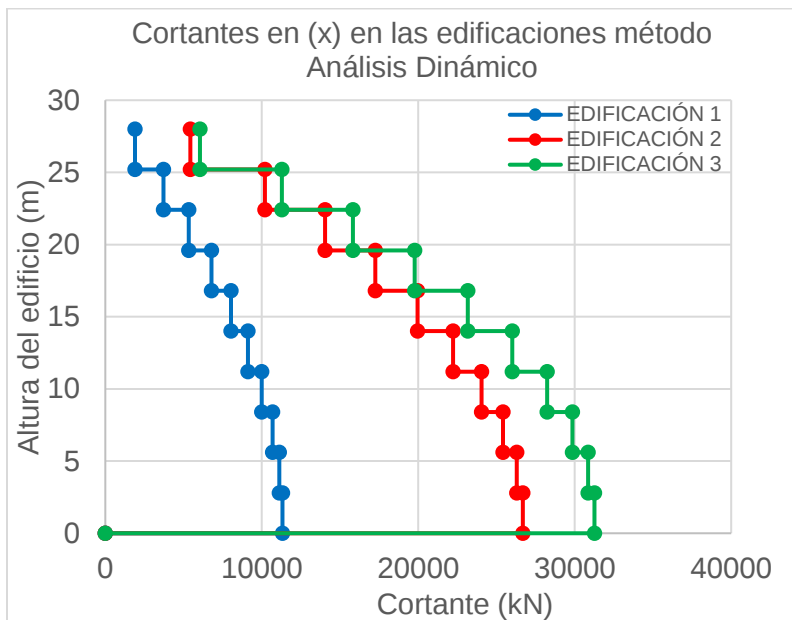
Figura 7.14.

Cortantes Estáticos en X. Casos de Estudio.



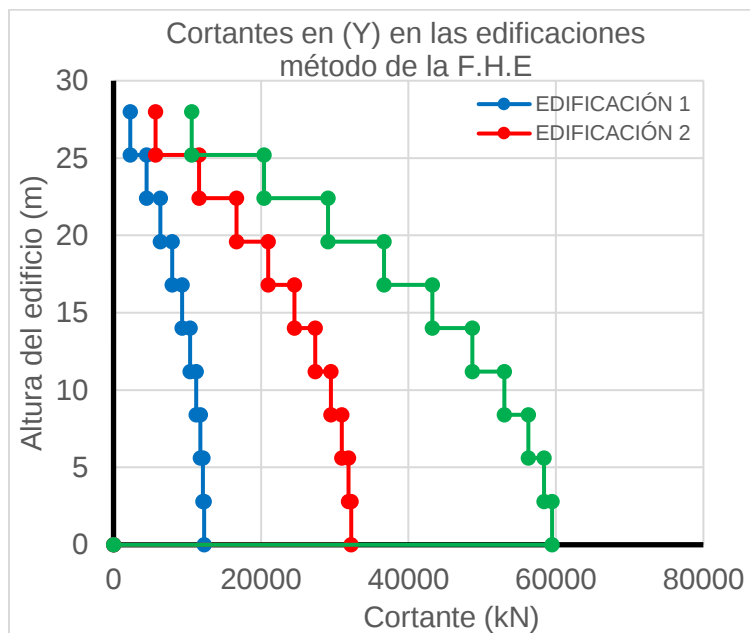
Fuente: Autor.

Figura 7.15.

Cortantes Dinámicos en X. Casos de Estudio.

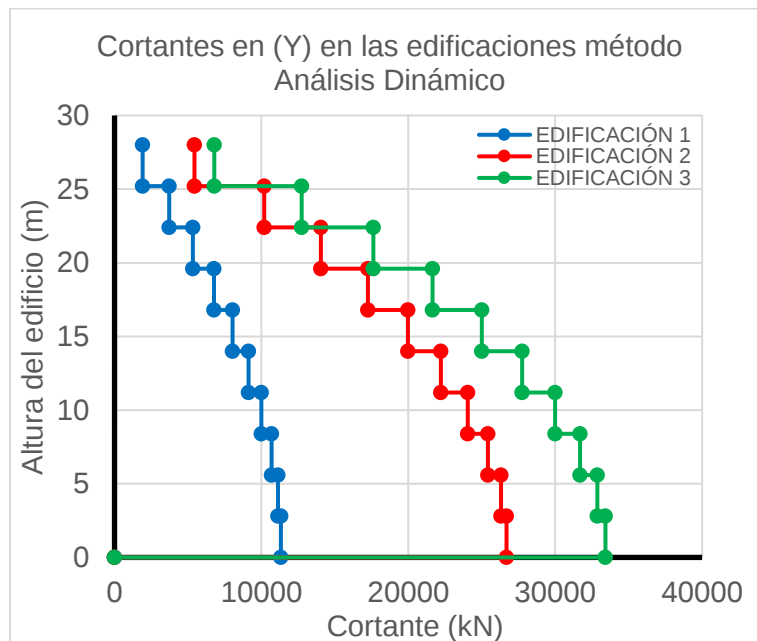
Fuente: Autor

Figura 7.16.

Cortantes Estáticos en Y. Casos de Estudio.

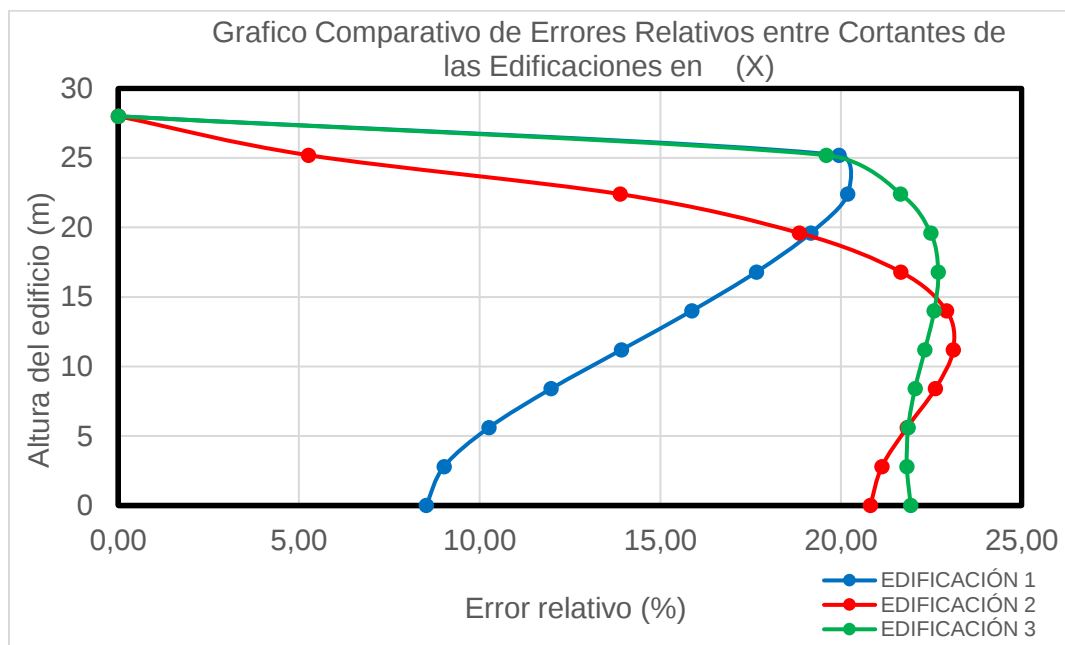
Fuente: Autor

Figura 7.17.

Cortantes Dinámicos en Y. Casos de Estudio.

Fuente: Autor.

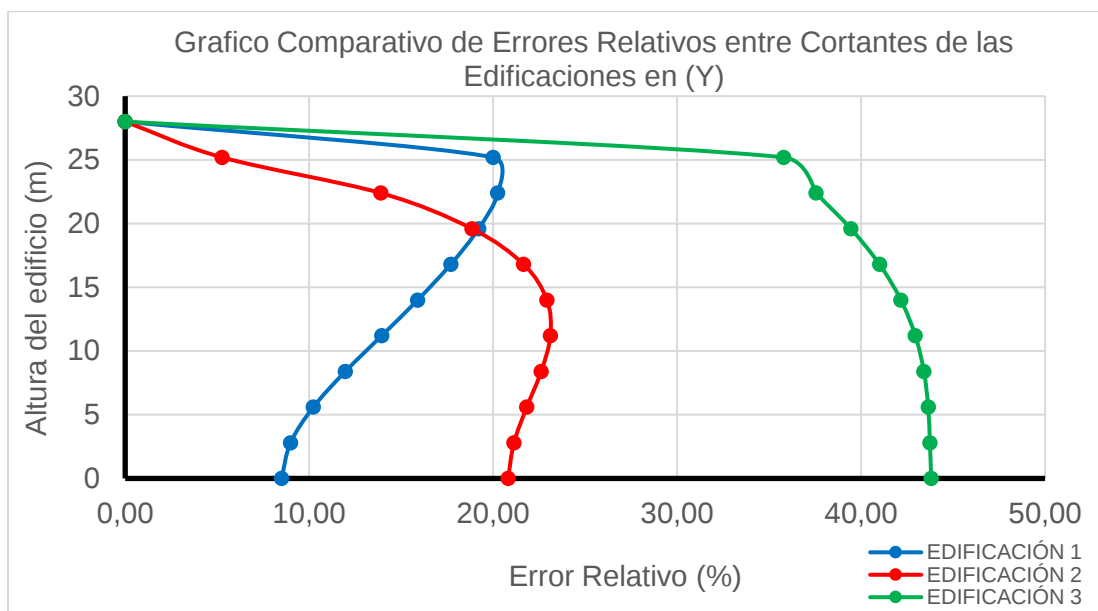
Figura 7.18.

Errores relativos entre cortantes en X. Casos de estudio.

Fuente: Autor.

Figura 7.19.

Errores relativos entre Cortantes en Y. Casos de estudio.



Fuente: Autor

Los resultados observados en las figuras 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, representan las comparaciones de los cortantes de piso hallados mediante la Fuerza Horizontal Equivalente y el Análisis Dinámico Elástico, donde se aprecian las diferencias entre las magnitudes por piso de los métodos de análisis.

La curva de errores relativos representada en los gráficos 7.18 y 7.19 muestran gráficamente la variabilidad hallada de los resultados obtenidos de los métodos de análisis. Con base en los gráficos mencionados, los cortantes de piso calculados por la FHE son mayores que los calculados mediante el Análisis Dinámico elástico, esto debido a que en la FHE se calculan teniendo en cuenta la masa, la altura y factores que dependen del periodo fundamental de la edificación y es repartido por los niveles de la edificación, mientras que el análisis dinámico elástico calcula los cortantes basando un espectro de aceleraciones en función de la fuerza resistida según la masa y rigidez de la edificación.

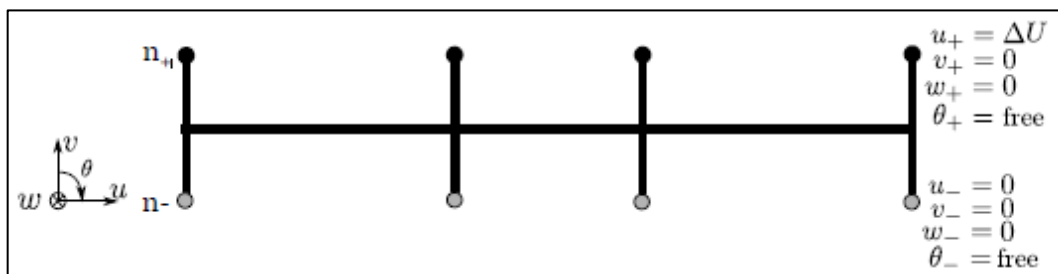
La FHE es un método conservador, el cual calcula sus fuerzas sísmicas en función de la masa y el periodo fundamental. Este periodo fundamental es mayor al calculado mediante el análisis dinámico elástico, permitiendo un aumento considerable en las fuerzas sísmicas para la FHE. El aumento considerable de las fuerzas sísmicas, implica un diseño de secciones más grandes que cumplan los requerimientos normativos para los desplazamientos máximos a causa de las fuerzas horizontales.

7.6 Cálculo de Propiedades Estáticas de Piso para la Definición del Comportamiento Dinámico de la Edificación.

Las propiedades estáticas de piso cumplen un factor importante en la caracterización del comportamiento mecánico de una edificación. Es por esto que estos tipos de análisis toman relevancia al describir los comportamientos de las estructuras, al encontrar rápidamente sus constantes macroscópicas, las cuales son indispensables para definir el comportamiento mecánico de una edificación. Las propiedades de piso, están definidas por su rigidez a cortante K_s , rigidez interna a flexión K_i , rigidez a flexión global K_g y la masa lineal de piso Λ . Para el cálculo de K_s , es necesario realizar un análisis estático de un modelo numérico de un solo piso, imponiendo un desplazamiento en los nodos, para así hallar los cortantes de piso en condiciones periódicas. Este modelo se realizó empleando el Software Etabs, diseñando un piso soportado con los elementos verticales superiores e inferiores a media altura e imponiendo restricciones en la base y en los nodos superiores, para permitir el desplazamiento y rotación de los elementos verticales. Las condiciones de modelamiento se presentan en la Figura 7.20.

Figura 7.20.

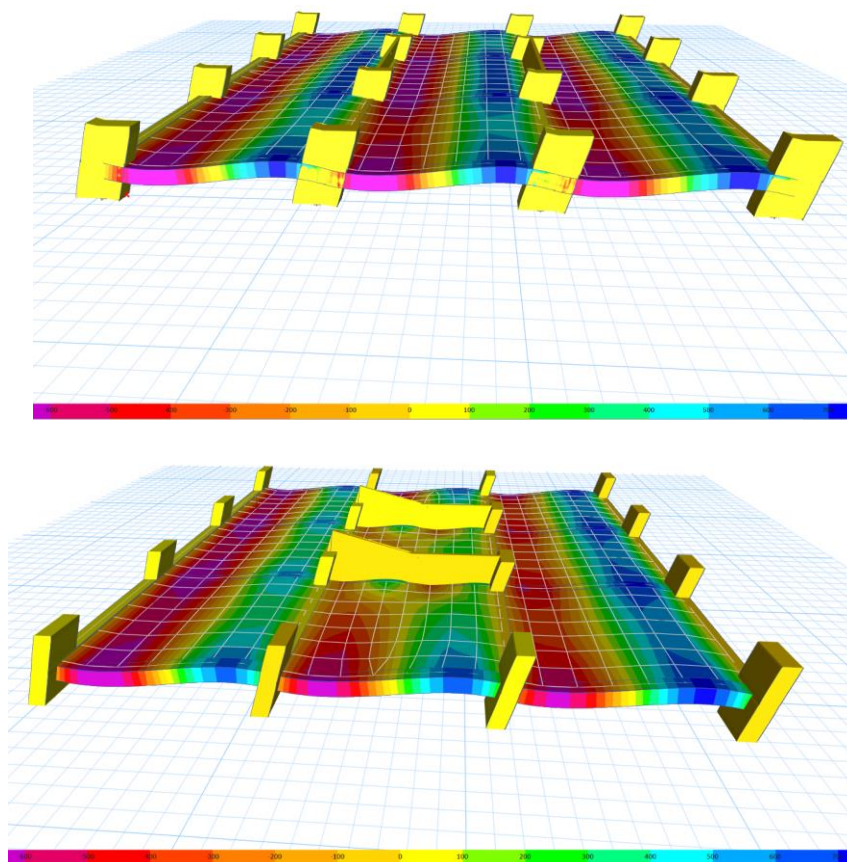
Condiciones límite de modelación para un solo piso.



Nota. Adaptado de Multiscale Modeling of the Seismic Response of Buildings: Coupling Homogenization and Multifiber Elements (p.98), por C. Franco, 2021, Gustave Eiffel University.

Figura 7.21.

Deformación por fuerza cortante de un Piso en Etabs. Caso 3, Superior: Sección longitudinal, Inferior: Sección transversal



Fuente: Etabs.

Nota: Los modelos de los casos de estudio faltantes, se encuentran en los anexos 2, 3 y

4.

Con base en lo anterior, los cálculos de las propiedades de piso K_s , K_i , K_g y Λ , fueron realizadas en Excel, definiendo las dimensiones transversales de los elementos, módulo de elasticidad del concreto. Para la flexión interna se define la Inercia Interna I_i y para la flexión global se calcula su inercia de la siguiente manera, $I_g = A_i d_i^2$. Los cálculos generales de las propiedades de piso se encuentran descritas mediante las siguientes expresiones:

$$[7.7] K_s = |\sum T| * \frac{l_m}{\Delta_u}$$

$$[7.8] K_i = \sum E_{ci} I_i$$

$$[7.9] K_g = \sum E_{ci} A_i d_i^2$$

Para K_s , T es la fuerza cortante en cada uno de los elementos verticales, l_m es la altura de piso y Δ_u es el desplazamiento impuesto en los nodos. Para K_i , E_{ci} es el módulo de elasticidad del concreto e I_i la inercia de la sección y, por último, para K_g , A_i es el área transversal de las columnas y d_i la distancia de la columna de análisis al centro de gravedad del piso. La masa lineal de piso Λ , se calcula fácilmente dividiendo la masa de piso y la altura de piso.

Tabla 30.

Propiedades de piso, K_s , K_i , K_g y Λ . Casos de Estudio

Caso de Estudio	Ks (MN)		Ki(MN*m2)		Kg(MN*m2)		Λ (kN/m)
	L(x)	T (y)	L(x)	T(y)	L(x)	T(y)	
E1	731.051	731.051	4.298	4.298	4476.611	4476.611	2.268
E2	990.485	990.485	127.388	127.388	62394.012	62394.012	2.289
E3	1923.204	2509.665	11.725	505.943	31833.680	30560.333	2.432

Fuente: Autor

7.6.1 Cálculo de las Constantes Macroscópicas de la Edificación.

En la definición del comportamiento dinámico de una edificación, es necesario hallar constantes macroscópicas definidas como C y γ , que permiten reducir los resultados descritos en la Tabla 30. Estos nuevos criterios evitan la realización de proceso extensos, dejando los resultados en valores de coordenadas X e Y , en el cual, el factor de escala ε , con base en los resultados obtenidos de las constantes C y γ , es un instrumento de rápida respuesta en la identificación del comportamiento dinámico de las estructuras, como se describe en la Figura 5.2. Las ecuaciones para hallar las constantes descritas anteriormente, se expresan a continuación.

$$[7.10] \varepsilon = \frac{\pi * L_m}{2H}$$

$$[7.11] C = \frac{k_g * L_m^2}{\varepsilon^2 * K_s}$$

$$[7.12] \gamma = \frac{K_s}{K_i}$$

Los constantes macroscópicas de las edificaciones se encuentran definidas en la Tabla 31.

Tabla 31.**Constantes macroscópicas. Casos de Estudio.**

Constantes Macroscópicas	
ε	0.157
C (E1)	1945.709
C (E2)	20015.725
C (E3L)	5259.419
C (E3T)	3869.177
γ (E1)	0.001
γ (E2)	0.002
γ (E3 (L))	0.000
γ (E3 (T))	0.017

Fuente: Autor.

Con base en los resultados anteriores, se procede a realizar la identificación del mecanismo dinámico que gobierna en cada uno de los casos de estudio, haciendo uso del Figura 5.2 propuesta anteriormente, convirtiendo las constantes macroscópicas en coordenadas X e Y presentadas en la Tabla 32. (Hans et al.,2008).

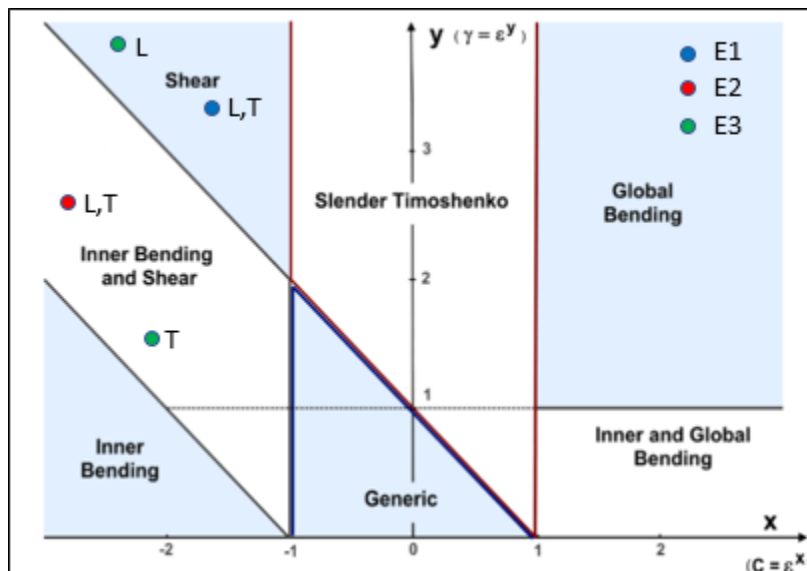
Tabla 32.**Valores en X e Y de las Constantes Macroscópicas. Casos de Estudio.**

EDIFICACIÓN	X	Y
#1	-4.0915031	3.75389671
#2	-5.3507621	3.34628798
#3 (L)	-4.6287222	4.27150006
#3 (T)	-4.4628777	2.21557474

Fuente: Autor.

Figura 7.22

Identificación del Comportamiento Dinámico de los Casos de Estudio.



Fuente: Autor.

La figura anterior representa el posicionamiento gráfico de los casos de estudio en sus sentidos transversales y longitudinales de los casos de estudio, donde el punto azul describe la edificación #1, el punto rojo la edificación #2 y el punto verde la edificación #3. Para las edificaciones 1 y 2, los parámetros macroscópicos fueron iguales para sus dos sentidos, mientras que para la edificación 3, tuvo variabilidad por su configuración geométrica y estructural. Con los resultados obtenidos, se corroboran los resultados previos con base en su razón de frecuencias y desplazamientos donde se predefinieron inicialmente, los comportamientos de las edificaciones.

8. Conclusiones y Recomendaciones

Para la investigación se analizaron 3 casos de estudio hipotéticos en la ciudad de Tunja, Boyacá, las cuales tienen las mismas características de zonificación y regularidad. El objetivo principal fue establecer diferencias en el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente y el Análisis Dinámico Elástico en sus resultados, evaluando edificaciones con diferente comportamiento dinámico propio, ya sea a cortante, flexión interna o flexión global. Esta investigación logra determinar diferencias clave entre los dos métodos, probando que la determinación del mecanismo dinámico que gobierna la edificación, es un factor de importancia que podría facilitar la selección del método de análisis de resistencia sísmica. Los resultados obtenidos muestran un aumento en la diferencia entre las fuerzas sísmicas obtenidas entre la Fuerza Horizontal Equivalente y el Análisis Dinámico Elástico, en la medida que el contraste de rigidez de los elementos aumenta. Con base en lo anterior, cabe recalcar que esta investigación no busca desmeritar ningún método exigido por la reglamentación colombiana sismo resistente, al contrario, busca optimizar los métodos de análisis con respaldo académico en pro y eficiencia en la construcción.

Los cortantes de piso calculados por la FHE son mayores que los calculados mediante el Análisis Dinámico elástico, esto debido a que en la FHE se calculan teniendo en cuenta la masa, la altura y factores que dependen del periodo fundamental de la edificación y es repartido por los niveles de la edificación, mientras que el análisis dinámico elástico calcula los cortantes basando un espectro de aceleraciones en función de la fuerza resistida según la masa y rigidez de la edificación.

La FHE es un método conservador, el cual calcula sus fuerzas sísmicas en función de la masa y el periodo fundamental. Este periodo fundamental es mayor al calculado mediante el análisis dinámico elástico, permitiendo un aumento considerable en las fuerzas sísmicas para la FHE. El aumento considerable de las fuerzas sísmicas, implica un diseño de secciones más

grandes que cumplan los requerimientos normativos para los desplazamientos máximos a causa de las fuerzas horizontales.

Los valores de periodo, masa y aceleración fueron estimados completamente bajo parámetros para la FHE y los exigidos por la reglamentación nacional, esto con el fin de realizar una comparativa más a fondo de las diferencias cuantitativas entre los métodos. Con base en lo anterior, la FHE realiza una estimación adicional de las fuerzas de diseño, debido a que no tiene en cuenta diferentes modos de vibración como en el Análisis Dinámico Elástico ni diferentes participaciones de la masa.

En la implementación del Análisis Dinámico Elástico, se evalúan las frecuencias y periodos de vibración de cada uno de las formas modales, teniendo en cuenta que la forma modal y las razones de frecuencias son parámetros iniciales para una caracterización del mecanismo dinámico que puede gobernar una edificación.

Los valores de la fuerza sísmica y los cortantes de piso de la Fuerza Horizontal equivalente, son iguales para los sentidos X y Y en todos los dos primeros casos de estudio, esto debido a la simetría y a los pocos parámetros de análisis de la FHE. Para el caso de estudio número 3, encontramos diferencias tanto en su periodo de vibración como de sus valores de fuerza sísmica y cortantes de piso, esto es debido a la adición de muros de concreto en el sentido Y de la edificación, lo cual influye directamente en la masa, rigidez y en sus modos de vibración.

Las fuerzas calculadas por la FHE, la localización de la edificación y la altura son factores que influyen en el control de derivas de la edificación. Esto debido a que los valores de las fuerzas sísmicas en una zona de amenaza sísmica alta calculados por la FHE, son de gran magnitud, lo cual haría que los diseños de sus elementos tengan grandes dimensiones y/o

necesiten el apoyo de muros de cortante y/o elementos que aporten rigidez a la estructura, para el control de sus desplazamientos adicionales a su sistema estructural.

La rigidez de una edificación es un factor fundamental para la vibración de una edificación, entré más rígida sea la estructura, los periodos de vibración serán más cortos en las formas modales de análisis, lo cual impediría grandes deformaciones en las edificaciones.

El caso de estudio que presenta mayor diferencia en el cálculo de los cortantes de piso, es el caso #3, este alcanzó una diferencia máxima en la base de 43.81%, seguido del caso #2 que presento una diferencia en el cortante del piso 5 de un 23.11% y por último el caso #1 con una diferencia máxima de 20.24% en el piso 9.

Las derivas máximas permitidas para cada uno de los casos de estudio, a pesar de tener la misma altura, no coincidieron en el mismo nivel. Para el caso #2 el desplazamiento máximo se presentó en el nivel 7 (0.01), en el caso #3 en el nivel 6 (0.009) y el caso #1 en el nivel número 4 (0.009). Esto debido a la variación en la geometría de las edificaciones y la rigidez de sus elementos estructurales.

En el proceso de caracterización e identificación del comportamiento dinámico de los casos de estudio, se validan cada uno de los parámetros de identificación inicial con base en su desplazamiento y razones de frecuencia al verificar gráficamente que la edificación #1, se comporta dinámicamente a cortante, y las edificaciones 2 y 3, tienen comportamientos a flexión interna y cortante. La facilidad de identificación del comportamiento mecánico lo convierte en un parámetro útil y sencillo para la descripción y análisis dinámico de una edificación, el cual se convierte en un candidato ideal como parámetro fundamental en la selección del método de resistencia Sísmica.

En el desarrollo del código numérico mencionado en los objetivos específicos, por cuestiones de tiempo, no se alcanzó a implementar en la etapa actual de estudio. Este objetivo se encuentra en desarrollo debido a la importancia que este aportaría a la investigación, el cual, permitiría análisis más eficientes en el momento de analizar una mayor cantidad de estructuras. El desarrollo total de esta investigación se presentará como artículo ponente, en el Décimo Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica - 2022 en la ciudad de Bogotá.

Se recomienda realizar un estudio a mas edificaciones en diferente zona para establecer diferencias de localización en los sistemas de disipación sísmica a nivel nacional. Esto con el fin de aumentar la obtención de datos cualitativos y cuantitativos para validar la hipótesis de esta investigación. Por último, los resultados encontrados respaldan la posibilidad para una discusión de validación normativa con respaldo investigativo al plantear el mecanismo dinámico de una estructura como parámetro fundamental, en el momento de selección para el análisis de resistencia sísmica, al demostrar la posibilidad de la optimización de los métodos de análisis teniendo en cuenta la existencia de los estados propios de comportamiento de una edificación que a su vez, se verá reflejado en una posible reducción en los costos de construcción.

9. Glosario

- **Aceleración:** Proceso en el que se encuentra una variación de la velocidad.
- **Altura:** Distancia vertical entre dos puntos de referencia
- **Análisis sísmico:** Determina los esfuerzos y deformaciones de una estructura al someterla a una fuerza.
- **Arriostramiento:** Elemento que estabiliza o rigidiza una estructura impidiendo sus desplazamientos.
- **Columna:** Elemento vertical cuya sollicitación principal son los esfuerzos a compresión.
- **Comportamiento dinámico:** Variación del comportamiento de una estructura con respecto al tiempo.
- **Construcción:** proceso mediante el cual se elabora infraestructuras.
- **Contraste:** Diferencias opuestas significativas producidas entre elementos estructurales.
- **Corroboración:** Argumentar alguna teoría con apoyo investigativo o académico.
- **Cortante:** Esfuerzo interno producido por las tensiones diagonales o paralelas de un elemento estructural.
- **Costo:** Cantidad de dinero que se paga por algo.
- **Deformación:** Cambio en las dimensiones de un elemento al ser sometido a esfuerzos.
- **Desplazamiento:** Cambio de posición de un elemento con respecto a un punto de referencia en dos instantes de tiempo.
- **Edificación:** Construcción de grandes dimensiones para uso y actividad humana.
- **Esfuerzo:** Es la fuerza aplicada a determinada área transversal de algún elemento.

- **Espectro sísmico:** Parámetros de valoración del suelo en vibraciones sísmicas.
- **Espesor:** Medida más pequeña en un cuerpo tridimensional.
- **Flexión:** Deformación presentada en un elemento estructural en dirección perpendicular a su eje.
- **Frecuencia:** Número de ciclos de vibración unidad de tiempo.
- **Fuerza:** Magnitud que provoca el cambio del estado de un cuerpo en su forma o velocidad.
- **Geometría:** Idealiza secciones en términos de propiedades y medidas de figuras geométricas.
- **Gravedad:** Causa natural en la cual dos cuerpos de masa se atraen entre sí.
- **Inercia:** Propiedad de los cuerpos en permanecer en un estado de reposo o movimiento.
- **Irregularidad:** Indicador de cambios en la altura, masa y rigidez a lo largo y ancho de una edificación
- **Losa de entrepiso:** Elemento vertical estructural cuya función es dividir los pisos y servir como base para las cargas de servicio.
- **Masa:** Cantidad de materia que tiene un cuerpo.
- **Modelo numérico:** Cálculo numérico empleado en la ciencia para corroborar o refutar hipótesis planteadas.
- **Muro:** Elemento vertical que permite dividir o limitar un espacio.
- **Periodo:** Tiempo para cumplir un ciclo.
- **Reglamento:** Reglas o normas a seguir emitidas por una autoridad competente que regulan un sector en particular.

- **Resistencia sísmica:** capacidad estructural que posee una edificación al ser construida con materiales y dimensiones apropiadas que posean la resistencia para soportar la acción de fuerzas horizontales producidas por eventos sísmicos
- **Resonancia:** Propiedad en la cual las frecuencias de los componentes estructurales coinciden entre sí con las del suelo generando un proceso de amplificación dinámica.
- **Rigidez:** Capacidad de un objeto de resistir a la deformación.
- **Sección transversal:** Corte bidimensional a un elemento tridimensional para obtener sus dimensiones.
- **Sismo:** Vibraciones en la superficie terrestre producido por un movimiento tectónico de placas.
- **Variación:** Cambio o alteración con respecto al tiempo de un estado a otro.
- **Veracidad:** Demostración de una afirmación respecto a un hecho refiriéndose a la fidelidad de una idea.
- **Vibración:** Movimiento repetitivo alrededor de una posición de equilibrio.
- **Viga:** Elemento estructural horizontal cuya sollicitación principal son los esfuerzos a flexión.
- **Vulnerabilidad:** Fragilidad o susceptibilidad que posee un elemento a una situación de amenaza o posibilidad de sufrir un daño.

10. Referencias Bibliográficas.

- Araque Lavallo, L. V. (2013). Desarrollo de un software en Java para el cálculo de fuerzas sísmicas usando el método de la fuerza horizontal equivalente.
- Awad, R. R. (2012). Análisis y diseño sísmico de edificios. Universidad Eafit.
- Barbat, A. H., & Canet, J. M. (1994). Estructuras sometidas a acciones sísmicas: cálculo por ordenador. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Boutin, C., & Hans, S. (2003). Homogenisation of periodic discrete medium: Application to dynamics of framed structures. *Computers and Geotechnics*, 30(4), 303-320.
- Carolina, F., Chesnais, C., Semblat, J. F., Desprez, C., & Giry, C. (2019, September). Une technique d'homogénéisation appliquée aux bâtiments périodiques multiportiques. In 10ème colloque national de l'AFPS-AFPS'19.
- Chaallal, O., Gauthier, D., & Malenfant, P. (1996). Classification methodology for coupled shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 122(12), 1453-1458.
- Chajes, M. J., Finch Jr, W. W., & Kirby, J. T. (1996). Dynamic analysis of a ten-story reinforced concrete building using a continuum model. *Computers & structures*, 58(3), 487-498.
- Chaparro Tarazona, Villalba Morales, J. D., Benjumea Royero, J. M., & Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. Tesis. (2017). INFLUENCIA DE LA CAPACIDAD DE DISIPACION DE ENERGIA SELECCIONADA EN EL COMPORTAMIENTO SIMICO Y COSTO DE EDIFICIOS APORTICADOS DE CONCRETO REFORZADO LOCALIZADOS EN ZONAS DE AMENAZA SISMICA BAJA E INTERMEDIA EN COLOMBIA [recurso electronico]. UIS.
- Chesnais, C. (2010). Dynamique de milieux réticulés non contreventés: application aux bâtiments (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).

Chesnais, C., Hans, S., & Boutin, C. (2011). Dynamics of reticulated structures: Evidence of atypical gyration modes. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*, 9(5).

Conesa Costa, A. (2013). Estudio de vibraciones transversales en vigas dañadas.

Corzo, K. (2005). Diseño de un modelo estructural con el programa ETABS. Trabajo de graduación. Facultad de ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Eftekhari Azam, Saeed & Chatzi, Eleni & Papadimitriou, Costas & Smyth, Andrew. (2015). Experimental validation of the Kalman-type filters for online and real-time state and input estimation. *Journal of Vibration and Control*. 23. 10.1177/1077546315617672.

Falcão, Jonas & Alves Carvalho, Rodolfo & Ribeiro, Renan & Moreno, Ledymar & Brito, José. (2020). INFLUENCE OF SLENDERNESS RATIO IN THE MODAL ANALYSIS BY ANALYTICAL FORMULATION. 121-135. 10.47964/1120.9010.19696.

Franco Ariza, Carolina. (2021). Multiscale Modeling of the Seismic Response of Buildings: Coupling Homogenization and Multifiber Elements. PhD thesis. Gustave Eiffel University.

Gil, John. (2012). CÁLCULO DE LA FUERZA SISMICA APLICANDO EL MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y EL ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO CRONOLÓGICO BAJO LOS LINEAMIENTOS DEL NUEVO REGLAMENTO SISMO RESISTENTE COLOMBIANO NSR-10 PARA UNA ESTRUCTURA TIPO DE 5 NIVELES UBICADA EN LA CIUDAD DE SAN JOSE DE CÚCUTA. 10.13140/RG.2.2.33772.51846.

Gonella, S., & Ruzzene, M. (2008). Homogenization of vibrating periodic lattice structures. *Applied Mathematical Modelling*, 32(4), 459-482.

Hans, S., & Boutin, C. (2008). Dynamics of discrete framed structures: a unified homogenized description. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 3(9), 1709-1739.

Lizcano Carreño, Y. L., & Tobo Cáceres, L. C. (2019). Análisis estático de fuerzas horizontales equivalentes comparado con el análisis dinámico modal espectral y cronológico en las edificaciones regulares e irregulares del área metropolitana de Bucaramanga.

Monleón, S., & Lázaro, C. (2011). El concepto de hiperviga como generalización de los modelos unidimensionales en la estática de piezas alargadas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 27(4), 294-303.

Potzta, G., & Kollar, L. P. (2003). Analysis of building structures by replacement sandwich beams. *International Journal of Solids and Structures*, 40(3), 535-553.

Reyes, L. E. G. (1998). Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de la Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.

Richardson, M. H. (1997). Is it a mode shape, or an operating deflection shape?. *Sound and Vibration*, 31(1), 54-67

Rotondo, L. M. B., & Barbat, A. H. (1999). Diseño sismorresistente de edificios. Reverté.

S.P. Timoshenko, en: *History of Strength of Materials*, McGraw-Hill. Reeditado por Dover en, 1953, 1983

Sísmica, A. (2010). NSR-10. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente. Bogotá D.C., Colombia.

Smith, B. S., Kuster, M., & Hoenderkamp, J. C. D. (1984). Generalized method for estimating drift in high-rise structures: *J. Struct. Division ASCE*, Vol 110 No 7 (July 1984) pp 1549–1562. *Computer-Aided Design*, 16(6), 338.

Tollenaere, H., & Caillerie, D. (1998). Continuous modeling of lattice structures by homogenization. *Advances in Engineering Software*, 29(7-9), 699-705.

11. Anexos

Anexo 1. Métodos de resistencia sísmica. Casos de estudio.

Anexo 2. Modelación Etabs. Caso de estudio 1.

Anexo 3. Modelación Etabs. Caso de estudio 2.

Anexo 4. Modelación Etabs. Caso de estudio 3.