

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VARIACIONES ECONÓMICAS ENTRE EL
MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y EL MÉTODO DE
ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO EN EDIFICACIONES REGULARES DE 3, 8 Y
16 PISOS EN ZONA DE RESPUESTA SÍSMICA LACUSTRE 500**

**ALZATE VARGAS MAIRA ALEJANDRA
JIMENEZ SANCHEZ SERGIO DAVID**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2015

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS VARIACIONES ECONÓMICAS ENTRE EL
MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y EL MÉTODO DE
ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO EN EDIFICACIONES REGULARES DE 3, 8 Y
16 PISOS EN ZONA DE RESPUESTA SÍSMICA LACUSTRE 500**

**ALZATE VARGAS MAIRA ALEJANDRA
JIMENEZ SANCHEZ SERGIO DAVID**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Asesor disciplinar: Julio Oswaldo Torres Suarez
Profesor área de estructuras**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

11 de Junio 2014

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3.	HIPÓTESIS	6
4.	JUSTIFICACIÓN	7
5.	OBJETIVOS.....	9
5.1	OBJETIVO GENERAL	9
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
6.	ANTECEDENTES	10
7.	MARCOS REFERENCIALES.....	14
7.1	MARCO TEÓRICO.....	14
7.1.1	Nociones fundamentales del diseño estructural.....	14
7.1.2	Aspectos sísmicos de Colombia	16
7.1.3	Propiedades mecánicas de las edificaciones.....	20
7.1.4	Espectros de respuesta	22
7.1.5	Elementos constitutivos del análisis	24
7.1.6	Método de la fuerza horizontal equivalente	26
7.1.7	Método del análisis dinámico elástico.....	31
7.2	MARCO CONCEPTUAL	34
7.3	MARCO JURIDICO	36
7.4	MARCO GEOGRAFICO	38
8.	DISEÑO METODOLÓGICO	40
8.1	ENFOQUE CUANTITATIVO.....	40
8.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	41
8.3	FASES DE LA INVESTIGACION.....	42
8.3.1	Fase I: Parámetros geométricos y sísmicos	42

8.3.2	Fase II: Análisis métodos de resistencia sísmica	43
8.3.3	Fase III: Procesamiento de la información	44
8.4	TECNICAS E INSTRUMENTOS	45
8.4.1	Variables	46
8.4.2	Operacionalización de variables	47
9.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	51
9.1	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ESTRUCTURAL	51
9.1.1	Definición del sistema de resistencia sísmica	52
9.1.2	Análisis sísmico de la estructura.....	57
9.1.3	Derivas	63
9.1.4	Combinaciones de las diferentes sollicitaciones.....	64
9.2	COMPARACIÓN MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y MÉTODO ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO	64
9.2.1	Índice de deriva máxima.....	64
9.2.2	Peso sistema de resistencia sísmica y fuerza sísmica.....	65
9.2.3	Relación peso acero-volumen de concreto.....	66
9.2.4	Máximos esfuerzos en vigas y columnas.....	67
9.2.5	Costo de concreto	68
9.2.6	Costo de acero	70
9.2.7	Costo total del sistema de resistencia sísmica.....	71
10.	CONCLUSIONES.....	73
11.	BIBLIOGRAFIA.....	75
12.	ANEXO 1.....	78
12.1	ANALISIS DINAMICO ELASTICO	78
12.1.1	Memorias de cálculo edificación de 16 pisos	78
12.1.2	Planos estructurales edificación de 16 pisos	78
12.1.3	Memorias de cálculo edificación de 8 pisos	78
12.1.4	Planos estructurales edificación de 8 pisos	78

12.1.5	Memorias de cálculo edificación de 3 pisos	78
12.1.6	Planos estructurales edificación de 3 pisos	78
12.2	FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE	78
12.2.1	Memorias de cálculo edificación de 16 pisos	78
12.2.2	Planos estructurales edificación de 16 pisos	78
12.2.3	Memorias de cálculo edificación de 8 pisos	78
12.2.4	Planos estructurales edificación de 8 pisos	78
12.2.5	Memorias de cálculo edificación de 3 pisos	78
12.2.6	Planos estructurales edificación de 3 pisos	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Descripción de las zonas de respuesta sísmica. Bogotá D.C.....	19
Tabla 2.	Variables independientes e indicadores de variables	47
Tabla 3	Estimación del cortante basal	48
Tabla 4	Predimensionamiento de columnas	49
Tabla 5.	Variables dependientes e indicadores de variable.	50
Tabla 6.	Alturas y espesores mínimos para vigas no preesforzadas.....	52
Tabla 7.	Sistemas estructurales.....	53
Tabla 8.	Dimensionamiento de vigas – Método FHE.	54
Tabla 9.	Dimensionamiento de vigas – Método Análisis Dinámico Elástico.	54
Tabla 10.	Dimensionamiento Columnas – Método FHE.....	55
Tabla 11.	Dimensionamiento Columnas – Método Análisis Dinámico Elástico.	55
Tabla 12.	Dimensionamiento Muros Estructurales.	55
Tabla 13.	Nivel de amenaza sísmica – Movimientos sísmicos de diseño.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Tipos de ondas sísmicas.	15
Figura 2.	Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función Aa y Av.....	17

Figura 3. Zona de respuesta sísmica. Bogotá D.C.	18
Figura 4. Ductilidad.....	21
Figura 5. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción g.....	24
Figura 6. Localidades de Bogotá D.C.	38
Figura 7. Espectro sísmico de diseño – Lacustre 500.....	57
Figura 8. Análisis sísmico fuerza horizontal equivalente.	58
Figura 9. Fuerza sísmica en la dirección X.	58
Figura 10 Fuerza sísmica en la dirección Y.	59
Figura 11. Casos de carga.....	59
Figura 12. Espectro sísmico de diseño.	60
Figura 13. Casos espectrales de carga, sismo X y sismo Y.....	60
Figura 14. Fuentes de masa.....	61
Figura 15. Carga de losas y vigas de rigidez.	61
Figura 16. Modos de vibración.....	62
Figura 17 Ajuste de datos.....	63
Figura 18. Verificación del 80% del cortante basal Vs.	63
Figura 19. Índice de deriva máxima.	65
Figura 20. Peso del sistema de resistencia sísmica y fuerza sísmica.....	66
Figura 21. Peso acero de refuerzo vs volumen de concreto.	67
Figura 22. Máximos esfuerzos presentados en vigas y columnas.....	68
Figura 23. Costo de concreto en vigas, columnas y muros.....	69
Figura 24. Costo total de concreto del sistema de resistencia sísmica.....	69
Figura 25. Costo de acero en vigas y columnas.....	70
Figura 26. Costo total de acero del sistema de resistencia sísmica.....	71
Figura 27. Costo total del sistema de resistencia sísmica.....	72

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Periodo fundamental de la edificación.....	28
Ecuación 2. Periodo fundamental aproximado.....	28

Ecuación 3. Cortante en la base.....	29
Ecuación 4. Coeficiente C_{vx}	30
Ecuación 5. Fuerza sísmica horizontal.....	30
Ecuación 6. Numero de modos de vibración.....	33
Ecuación 7. Cortante modal en la base.	33
<i>Ecuación 8. Carga de falla de una columna sometida a carga axial.</i>	<i>49</i>

1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento Colombiano Sismo Resistente NSR-10 reconoce varios métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica para efectos de su diseño, entre los cuales se encuentra el método de la fuerza horizontal equivalente, y el método de análisis dinámico elástico. Estos métodos son aproximados y carecen de ciertas características que permitan aplicarlos a tipos muy específicos de estructuras. En la actualidad, el método de la fuerza horizontal equivalente FHE es el más utilizado, es importante destacar que la norma de manera obligatoria obliga principalmente a edificaciones gubernamentales a utilizar el método de la FHE para analizar el volcamiento de la edificación, sin embargo, no existe evidencia clara respecto a las diferencias que puedan presentarse en los resultados de esfuerzos en cada uno de los elementos estructurales que hacen parte del sistema de resistencia sísmica. Así mismo, no se encuentran investigaciones que establezcan cuál de los dos métodos de análisis estructural es más óptimo para diseños en edificaciones regulares de baja, mediana y gran altura.

Sin embargo, existen investigaciones con información relevante, la cual está relacionada con respecto a este particular, entre ellas, se encuentran trabajos de grados aplicados a configuraciones de estructuras irregulares en los cuales se comparan los métodos en mención. Las XIII jornadas estructurales de la ingeniería colombiana correspondientes al año de 1.999, de la Sociedad Colombiana de Ingenieros y La Asociación Colombiana de Ingenieros Estructurales, cuenta con un estudio denominado *Aumento relativo de costos de estructuras de concreto reforzado debido a la aplicación de las NSR-98 y el uso de la microzonificación sísmica de Bogotá*, cuyo objeto es estimar el aumento de las cantidades de materiales de construcción y costos en estructuras de concreto reforzado de 5 y 10 pisos con varias configuraciones estructurales utilizando la NSR-98 y el estudio de la microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá. La investigación estableció que

hay aumentos en los costos con respecto a los valores obtenidos con la reglamentación CCCSR-84 debido a que la NSR-98 es más rigurosa en sus exigencias.

El objetivo principal de este proyecto, consiste en evaluar las fuerzas sísmicas aplicadas a estructuras regulares de 3, 8 y 16 pisos respectivamente, localizada en zona de respuesta sísmica lacustre 500, con el fin de analizar el método de la fuerza horizontal equivalente, y el método de análisis dinámico elástico, con el grado de detalle suficiente para poder evaluar su costo, ya que se determinan teóricamente las cantidades de acero y concreto modelando individualmente los métodos de diseño bajo los requisitos del Reglamento Colombiano Sismo Resistente NSR-10.

Finalmente con los datos obtenidos se realiza un análisis de las variaciones económicas en el sistema resistencia sísmica en cada una de las edificaciones, comparando los métodos mencionados entre si e identificando el método de análisis sismo resistente más adecuado y exacto según las características con que cuenta la estructura, lo que permitiría generar bases para concebir proyectos que no solo se comporten adecuadamente ante sollicitaciones sísmicas cumpliendo con los requisitos de la norma sismo resistente, si no que adicionalmente sean viables económicamente y por ende se mitiguen impactos ambientales de infraestructura de obra civil.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia se encuentra ubicada en una zona de intensa actividad sísmica, a bordes del Pacífico en una de las franjas de subducción pertenecientes al denominado cinturón de fuego del Pacífico, entre el 80% y 90% de la población Colombiana habita en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. Dentro de la significativa cantidad de sismos que se presentan frecuentemente en el territorio nacional, algunos como el sucedido en Armenia en el año de 1.999, evidencian el daño causado a construcciones civiles, víctimas fatales, deterioro de la calidad de vida y pérdidas económicas, estos efectos son el producto de la incapacidad de la respuesta sísmica de muchas edificaciones.

En este sentido, el propósito de las disposiciones contempladas en la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR-10 se fundamenta en enfocar el diseño de estructuras hacia la preservación de la vida humana y el desarrollo de estructuras altamente funcionales, es decir, que contemplen consideraciones de carácter sísmico en el diseño y construcción de edificaciones. En el título A.3.4 la NSR-10 reconoce diversos métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica para el diseño de edificaciones entre los cuales se encuentran el método de la fuerza horizontal equivalente y el análisis dinámico elástico. Estos métodos son aproximados y carecen de ciertas características que permitan aplicarlos a tipos muy específicos de estructuras, a continuación se mencionan algunos de los factores que se encuentran relacionados y fundamentan la necesidad de dar solución a dicha problemática.

El método de la fuerza horizontal equivalente consiste en la idealización de la estructura obviando el carácter dinámico de las estructuras debido a efectos producidos por los sismos y en su lugar considera fuerzas estáticas concentradas aplicadas en el centro de masa de los entrepisos, es decir, el sismo se analiza como una sola fuerza. El análisis dinámico involucra el estudio detallado del

comportamiento de las estructuras sometidas a excitaciones sísmicas e incluye modos de vibración más significativos en la descripción del comportamiento de la estructura.

Tanto el método de la fuerza horizontal equivalente como el método de análisis dinámico elástico se encuentra acreditado por la Norma Sismo-Resistente Colombiana NSR-10. El método de la fuerza horizontal equivalente FHE es el más utilizado y abarca gran parte de las estructuras que se diseñan en el país ya que es sencillo de aplicar desde el punto de vista matemático en comparación con el método de análisis dinámico. Sin embargo, no existe evidencia clara respecto a las diferencias que puedan presentarse en los resultados de esfuerzos en cada uno de los elementos estructurales que hacen parte del sistema de resistencia sísmica, en edificaciones de baja, mediana y gran altura.

No existen investigaciones que establezcan cuál de los dos métodos de análisis estructural es más óptimo para diseños de edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.

Otro aspecto fundamental para el análisis de las estructuras son los parámetros asociados a la amenaza sísmica de la región del país donde se ubique la estructura, denominados efectos globales y efectos locales debidos al tipo de perfil de suelo, formación, caracterización y comportamiento mecánico de los mismos.

Según la NSR-10, Bogotá se encuentra en zona de amenaza sísmica intermedia, y de acuerdo con la microzonificación sísmica de Bogotá existen 17 zonas de amenaza de respuesta sísmica, de las cuales dependen los coeficientes que afecta la aceleración, entre ellas la zona lacustre 500.

Del anterior planteamiento del problema surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las variaciones de costos de las estructuras regulares empleando el análisis por el método de fuerza horizontal equivalente o por el método de análisis dinámico elástico en edificaciones de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500?

3. HIPÓTESIS

Los valores obtenidos del cálculo de fuerzas sísmicas de las edificaciones establecidas con alturas de 3, 8 y 16 pisos tienden a ser mayores con el método de la fuerza horizontal equivalente en comparación con los determinados por el método de análisis dinámico elástico, lo que sugiere que para este último método se esperan valores menores de deformaciones y esfuerzos en el análisis de las estructuras y disminución en los costos de construcción, en cantidades de acero y concreto de las mismas.

4. JUSTIFICACIÓN

El diseño sísmico de edificaciones en Colombia se rige por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente (NSR-10), el cual permite el uso de varias metodologías de análisis enfocadas en la determinación de acciones dinámicas en edificaciones para el diseño de su sistema de resistencia sísmica.

Entre estos métodos se encuentra el de la *fuerza horizontal equivalente FHE*, de acuerdo con Jaramillo¹, este análisis consiste en simplificar el comportamiento dinámico de la estructura a la consideración únicamente del modo de vibración fundamental. De esta forma se reemplaza la magnitud de la fuerza sísmica por un conjunto de fuerzas horizontales equivalentes aplicadas en los niveles de los pisos del edificio que equilibran el cortante de base.

Así mismo, existe el método de análisis dinámico elástico de los edificios, que “implica conocer ciertas propiedades que pueden calcularse a partir de un modelo matemático que represente su comportamiento estructural. En un proceso iterativo que parte de las fuerzas que proporciona el método de la fuerza horizontal equivalente se puede establecer cuál es el período del modo fundamental de vibración y cuál es su forma modal”.². El método modal espectral requiere como dato de partida para su aplicación conocer los modos y frecuencias naturales del sistema de múltiples grados de libertad, es decir que se conocen los valores de las frecuencias ω_i y de los modos Φ_i . La respuesta máxima de cada modo se obtiene utilizando las ordenadas del espectro de diseño definido, para el período de vibración propio del modo.

¹ JARAMILLO, J.O., Análisis Clásico de Estructuras. 2004: Universidad Nacional de Colombia

² BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Introducción al análisis dinámico de estructuras. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. p.1-9.

Los dos métodos establecen las bases y los requerimientos generales mínimos en el diseño de las estructuras, para que éstas ofrezcan seguridad adecuada, tal que, ante la acción del sismo máximo probable, no habrá fallas estructurales mayores ni pérdidas de vidas.

El análisis comparativo entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en zona de respuesta sísmica lacustre 500, permite establecer el impacto económico mediante el análisis y diseño de edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos, con el grado de detalle suficiente para poder evaluar su costo, ya que se determinaría teóricamente las cantidades de acero y concreto modelando individualmente los métodos de diseño a evaluar. Se precisa que el cambio en el costo de la estructura está determinado también por las modificaciones en los parámetros sísmicos y la configuración de la edificación. Entre las zonas de respuesta sísmica se encuentra la denominada lacustre 500, la cual corresponde a un tipo de suelos blandos, arcillas limosas o limos arcilloso, este tipo de suelos posee un espesor que llega entre 300m y 500m de profundidad y abarca una área importante en el occidente de la ciudad, localidades en proceso de desarrollo como Engativá, Fontibón, y Suba, fenómenos de autoconstrucción de pequeñas edificaciones, ambiciosos proyectos de vivienda multifamiliar y centros de negocios y oficinas en edificaciones de gran y mediana altura se construyen en la actualidad en esta zona.

Adicionalmente el estudio definiría cuál de los dos métodos de análisis estructural resulta óptimo para diseños de edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500, lo que permitiría generar bases para concebir proyectos que no solo se comporten adecuadamente ante sollicitaciones sísmicas cumpliendo con los requisitos de la norma sismo resistente, si no que adicionalmente sean viables económicamente y por ende se mitiguen impactos ambientales de infraestructura de obra civil.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar los resultados de las variaciones económicas de las estructuras empleando el análisis por el método de fuerza horizontal equivalente y por el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las fuerzas sísmicas que actúan sobre edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos.
- Analizar el método de fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.
- Describir las variaciones económicas derivadas del análisis comparativo entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.

6. ANTECEDENTES

El Reglamento Colombiano Sismo Resistente NSR-10 reconoce varios métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica para efectos de su diseño, entre los cuales está el método de la fuerza horizontal equivalente, y el método de análisis dinámico elástico, estos métodos son aproximados y carecen de ciertas características que permitan aplicarlos a tipos muy específicos de estructuras, el resultado es un análisis menos exacto y más lento.

Son escasas las investigaciones respecto a este particular donde se evalúen las diferencias en los resultados de desplazamientos en cada uno de los elementos estructurales que hacen parte del sistema de resistencia sísmica, sin embargo, se han seleccionado tres investigaciones, las cuales analizaron las diferencias entre algunos métodos de análisis estructural.

La primera investigación fue desarrollada por Clara Isabel González Castillo³ en un trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Civil de la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá en 1992. El trabajo denominado: *Comparación de los métodos: fuerza horizontal equivalente y análisis modal*. Su objetivo fue aplicar el método del análisis modal a un edificio de configuración irregular localizado en una zona de riesgo sísmico alto y comparar los resultados en cuanto a costos con los correspondientes al método de la fuerza horizontal equivalente. Por otro lado, describe tanto el método de la fuerza horizontal equivalente y los aspectos relacionados, como el método de análisis modal a partir de las ecuaciones de movimiento para hallar los modos de vibración de la estructura, con estos métodos se obtienen las fuerzas sísmicas que se utilizan en el análisis y diseño de estructuras. La monografía, presenta las características del edificio que se toma

³GONZÁLEZ CATILLO, Clara Isabel. Comparación de los métodos: fuerza horizontal equivalente y análisis modal. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de ingeniería civil, 1992.

como ejemplo, el análisis de la escalera, predimensionamiento de vigas, columnas y las cargas sobre los diferentes pórticos.

Asimismo, expone la aplicación de la teoría relacionada con la obtención de las fuerzas sísmicas por los dos métodos, el estudio del efecto de torsión y el grado de irregularidad del edificio. Explica la comparación de estos resultados por los dos métodos por medio de las fuerzas sísmicas, las derivas, la comparación de los esfuerzos y momentos máximos en las vigas por las diferentes combinaciones dadas en el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes y las conclusiones como resultado del estudio de la comparación.

La segunda investigación, en el marco de un trabajo de grado de la Universidad San Carlos de Guatemala, Joaquín Ortega Menéndez⁴ realizó un análisis comparativo entre sismo estático y dinámico para marcos de concreto reforzado con el fin de proporcionar un documento que sirviera como fuente de consulta y que contuviera el proceso de análisis sísmico de marcos de concreto reforzado utilizando el método estático y dinámico.

En la información contenida se destacan aspectos teóricos y de configuración estructural tales como sismos, sismología, inercia, rigidez, periodo de vibración, redundancia, proporción y simetría, entre otros. Adicionalmente contiene teoría fundamental en lo referente al análisis sísmico, evaluación del cortante basal y métodos de análisis estructural, específicamente referido al método estático y método dinámico, los cuales están íntegramente relacionados con el objeto del presente trabajo de investigación.

⁴ORTEGA, Joaquín. Análisis Comparativo entre Sismo Estático y Dinámico, para marcos de concreto reforzado. trabajo de grado (Ingeniero Civil). Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería civil. 2011. 89p.

La tercera investigación hace parte de las XIII jornadas estructurales de la ingeniería colombiana del año de 1.999, en ella, la Sociedad Colombiana de Ingenieros y La Asociación Colombiana de Ingenieros Estructurales. Los ingenieros Libardo Tinjacá, Luis Enrique García y Omar Cardona⁵ desarrollaron un estudio denominado Aumento relativo de costos de estructuras de concreto reforzado debido a la aplicación de las NSR-98 y el uso de la microzonificación sísmica de Bogotá, cuyo objeto es estimar el aumento de las cantidades de materiales de construcción y costos en estructuras de concreto reforzado de 5 y 10 pisos con varias configuraciones estructurales utilizando la NSR-98 y la microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá.

En este estudio se diseñaron edificios de área similar usando las disposiciones del código CCCSR-84 y la NSR-98 junto con la microzonificación sísmica con el fin de comparar el costo de cada estructura por unidad de área. Se estableció que hay aumentos en los costos con respecto a los valores obtenidos con la reglamentación CCCSR-84 debido a que la NSR-98 es más conservadora (menores derivas, mayores factores de carga).

Las investigaciones anteriormente mencionadas constituyen un fundamento básico en cuanto a información referente a los métodos de análisis estructural, sin embargo, aún permanece la incertidumbre en el tema específico de las variaciones económicas entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500, de manera que se planea establecer dichas variaciones con el fin de proporcionar información útil y aplicable, orientada a realizar diseños estructurales óptimos, confiables y responsables con el medio

⁵TINJACA, Libardo. GARCIA, Luis Enrique y CARDONA, Omar. Aumento relativo de costos de estructuras de concreto reforzado debido a la aplicación de las NSR-98 y el uso de la microzonificación sísmica de Bogotá. EN: XIII jornadas estructurales de la ingeniería colombiana. sociedad colombiana de ingenieros - Asociación Colombiana de ingenieros estructurales. Santafé de Bogotá D.C.1.999.p.249-273.

ambiente cumpliendo los requisitos mínimos de Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-10.

7. MARCOS REFERENCIALES

7.1 MARCO TEÓRICO

El marco teórico que se aborda en el siguiente capítulo, establece los enfoques teóricos y conceptuales generales de la ingeniería sísmica, así mismo se expone los criterios para aplicación del método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico, para determinar el análisis estructural más óptimo para diseños de edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.

7.1.1 Nociones fundamentales del diseño estructural

7.1.1.1 Sismología

Los sismos según Enrique Bazán y Roberto Meli⁶ son vibraciones de la corteza terrestre, generadas por distintos fenómenos entre ellos y el más importante desde el punto de vista de la ingeniería, son los de origen tectónico, que se deben a desplazamientos bruscos de las grandes placas en que esta subdividida la corteza. La liberación de grandes cantidades de energía principalmente en forma de ondas vibratorias se propaga a grandes distancias a través de la roca de la corteza.

Es esta vibración de la corteza terrestre la que pone en peligro las edificaciones que sobre ella se desplantan, al ser éstas requeridas por el movimiento de la base. Debido a los movimientos vibratorios de las masas de los edificios, se generan fuerzas de inercia que inducen esfuerzos importantes en los elementos de la estructura y que pueden conducir a la falla.

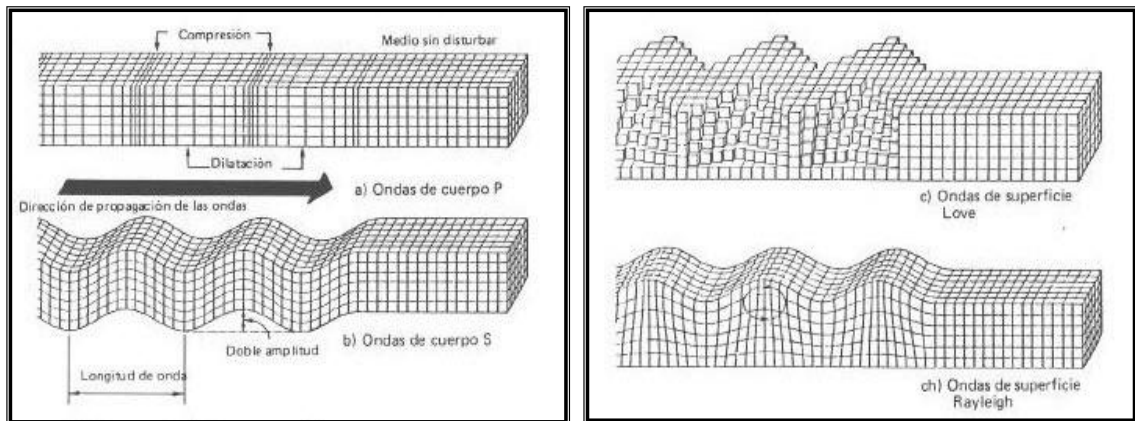
⁶ BAZÁN, Enrique y MELI, Roberto. Diseño sísmico de edificios. México: Limusa S.A, 1998. p15.

7.1.1.2 Ondas sísmicas

Las ondas sísmicas tienen su origen en el foco del sismo y se propagan a través de las capas de la tierra hasta la superficie. Carlos Vallecilla⁷ define tres tipos de ondas sísmicas:

- Ondas másicas: aquellas que se propagan a través de la tierra. A su vez, estas se clasifican en *ondas primarias u ondas de presión (P)*: longitudinales e implican cambio de volumen y en *ondas secundarias u ondas de corte (S)*: transversales y se propagan sin cambio de volumen.
- Ondas superficiales: se propagan a través de la corteza de la tierra. Se clasifican en dos tipos: las *ondas (R)* son las mismas que las ondas (P) y las *ondas love (L)* se propagan a través de los movimientos de las partículas perpendicularmente a la dirección de la propagación de la onda.
- Ondas libres: se presentan solamente durante sismos fuertes y son vibraciones de toda la tierra.

Figura 1. Tipos de ondas sísmicas.



Fuente: Bolt B.A. Terremotos

⁷ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Fuerzas sísmicas principios y aplicaciones. Bogotá: Bauen. 2003. p. 18.

7.1.1.3 Ingeniería sísmica

Para Alberto Sarria⁸ *la ingeniería sísmica* es la combinación de una serie de conceptos: la sismología, la dinámica de estructuras y de suelos, el diseño estructural y las propiedades dinámicas lineales y no lineales, de manera integrada, los cuales permiten el diseño de una construcción capaz de resistir los desplazamientos del terreno causados por los sismos. El procedimiento integrado que enfoca la ingeniería sísmica conduce a construcciones seguras, económicas y funcionales que soportan los intensos sacudimientos sísmicos que la puedan afectar en el futuro, son obras que protegen la vida y el patrimonio de la comunidad.

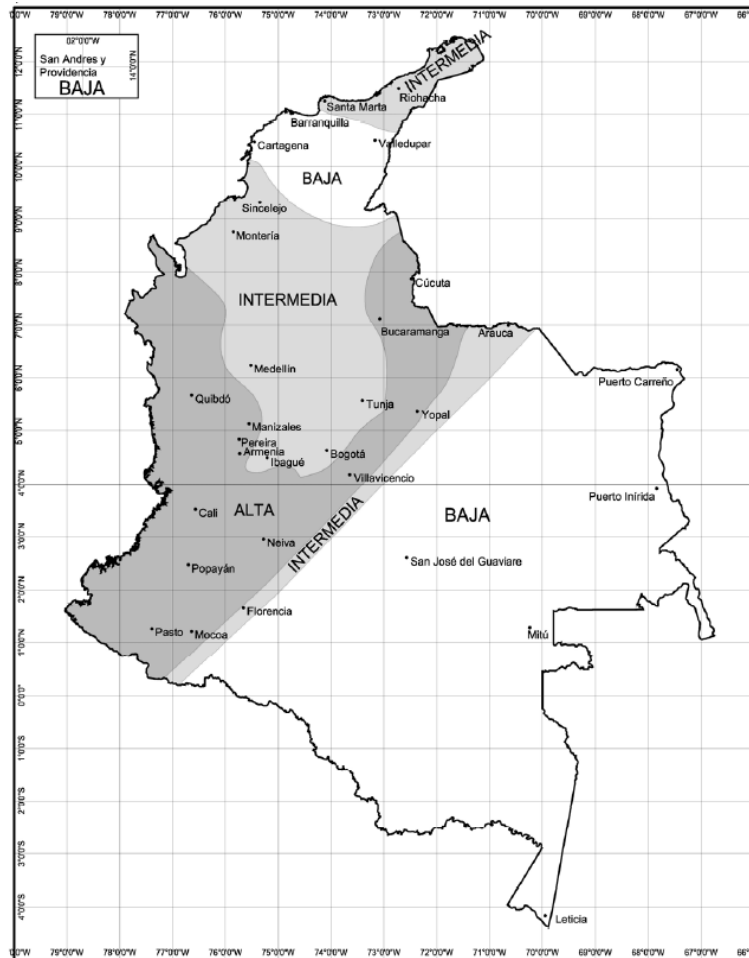
7.1.2 Aspectos sísmicos de Colombia

7.1.2.1 Zonas de amenaza sísmica

La norma NSR-10 divide el territorio de Colombia en tres zonas de amenaza sísmica: alta, media y baja. Esta división se llevó a cabo con base en la información histórica sobre todos aquellos sismos que se tiene noticia. Se debe consultar en la norma citada para comprobar que tipo de sistemas estructurales y qué tipo de materiales se pueden usar en cada región.

⁸ SARRIA MOLINA, Alberto. Ingeniería sísmica. 2 ed. Santa Fe de Bogotá: Ediciones Uniandes, 1995. p.2.

Figura 2. Zonas de Amenaza Sísmica aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función Aa y Av.

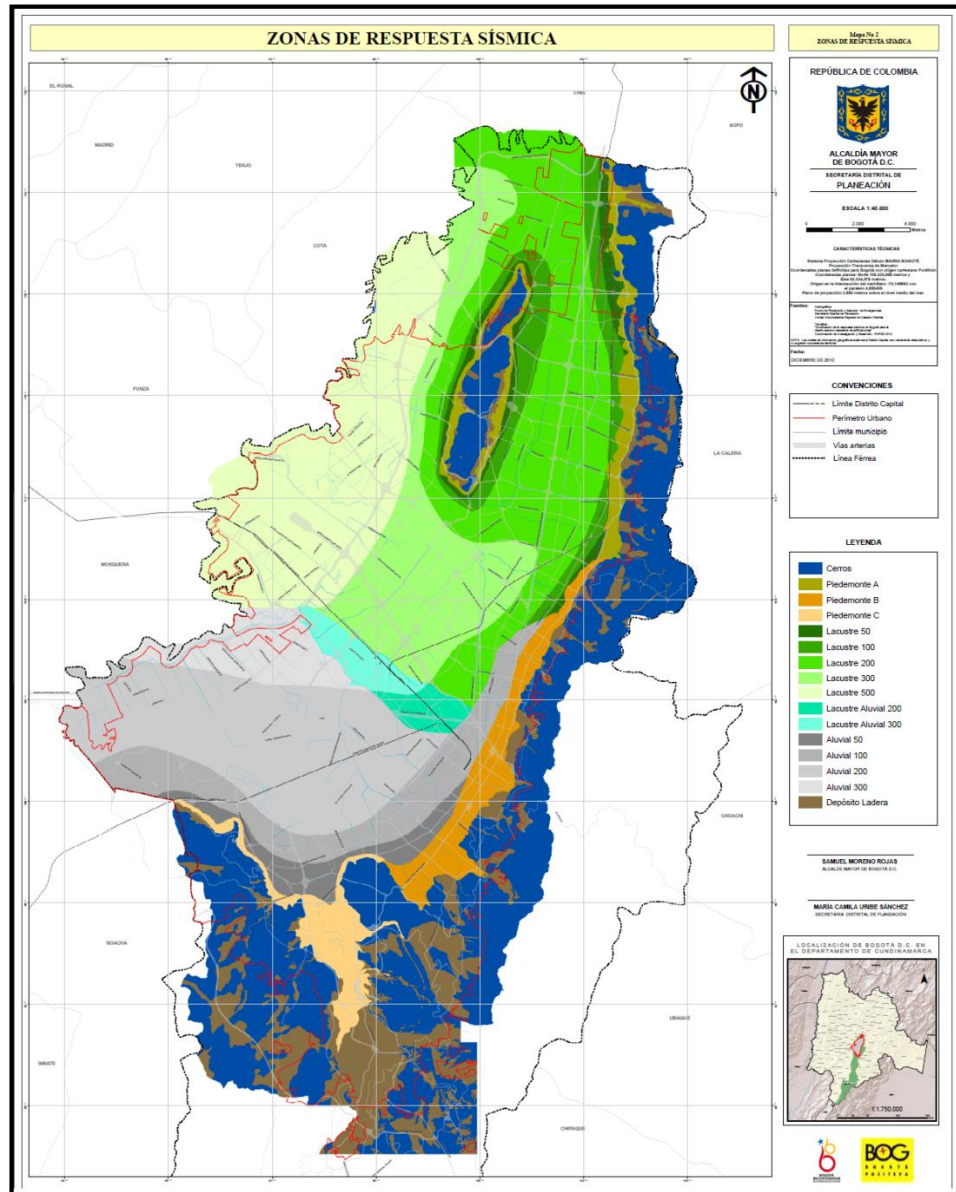


Fuente: Título A.2.3. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

7.1.2.2 Microzonificación sísmica para Bogotá

El decreto 523 – 2010, expedido por la Alcaldía mayor de Bogotá el 16 de Diciembre de 2010, por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.

Figura 3. Zona de respuesta sísmica. Bogotá D.C.



Fuente: Decreto 523-2010

Tabla 1. Descripción de las zonas de respuesta sísmica. Bogotá D.C.

ZONA	ESPESOR DEL DEPÓSITO (M)	PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO (S)	DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA GENERAL	VELOCIDAD ONDA PROMEDIO 50 M VS (M/S)	HUMEDAD PROMEDIO 50 M HN (%)	EFFECTOS DE SITIO RELACIONADOS
Cerro	-	< 0.3	Rocas sedimentarias y depósitos de ladera con espesores inferiores a 6 m	> 750	< 10	Topográfico
Piedemonte A	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con intercalaciones de arcillas blandas: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa, capas de arcillas blandas.	200 - 750	oct-80	Topográfico, amplificación
Piedemonte B	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con espesor superior a 12 m: Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o areno arcillosa	300 - 750	oct-30	Topográfico, amplificación
Piedemonte C	< 50	0.3-0.6				
Lacustre-50	< 50	1.0-1.5	Suelo lacustre blando:	< 175	> 80	Amplificación
Lacustre-100	50-100	1.5-2.5	Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba			Amplificación
Lacustre-200	100-200	2.5-3.5				Amplificación
Lacustre-300	200-300	3.5-4.5				Amplificación
Lacustre-500	300-500	4.5-6.5				Amplificación
Lacustre Aluvial-200	100-200	2.0-3.0	Suelo lacustre con intercalaciones de aluvial: Arcillas limosas o limos arcillosos con lentes de turba y capas de arenas compactas	< 200	> 60	Amplificación
Lacustre Aluvial-300	200-300	3.0-4.0				Amplificación

Aluvial-50	< 50	0.4-0.8	Suelo aluvial duro:	175 - 300	25 - 50	Amplificación, licuación
Aluvial-100	50-100	0.8-1.2	Arcillas limosas o arenas arcillosos o limos arenosos, en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias			Amplificación, licuación
Aluvial-200	100-200	1.2-2.5				Amplificación, licuación
Aluvial-300	200-300	2.5-4.0				Amplificación, licuación
Depósito Ladera	jun-25	< 0.3	Depósitos de ladera con espesores superiores a 6 m de composición variable.	Variable según depósito	Variable según el tipo de depósito	Topográfico

Fuente: Decreto 523-2010

7.1.3 Propiedades mecánicas de las edificaciones

7.1.3.1 Inercia

1ª Ley de Newton: “Todo cuerpo permanece en su estado de reposo, o movimiento uniforme rectilíneo, a menos que sea obligado a cambiar ese estado debido a la aplicación de cualquier tipo de fuerzas”

Joaquín Ortega Menéndez, define la inercia como “la propiedad de la materia de resistencia al movimiento o cambio de dirección del mismo. En el análisis sismo resistente la inercia de una edificación es proporcional a su masa y las fuerzas a aplicar para simular un sismo en un modelo son un porcentaje del peso total de la estructura”⁹.

⁹ ORTEGA, Joaquín. Análisis Comparativo entre Sismo Estático y Dinámico, para marcos de concreto reforzado. trabajo de grado (Ingeniero Civil). Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería civil. 2011. p5.

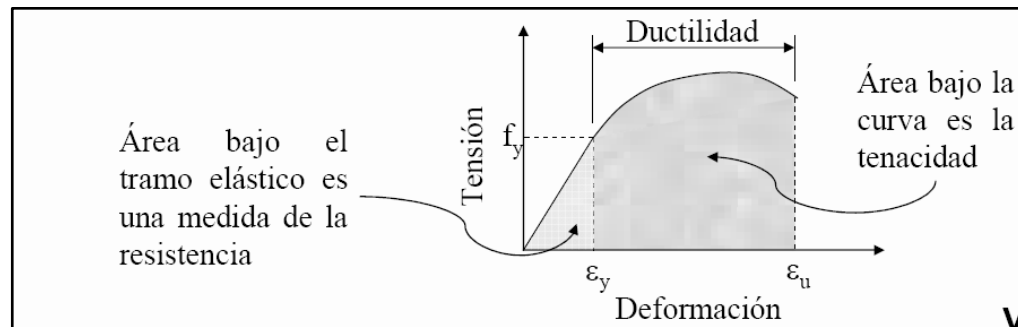
7.1.3.2 Periodo

El periodo lo puntualiza Kenny Rolando Corzo Véliz, como el “intervalo de tiempo en el cual un sistema masa-resorte completa un ciclo completo de tiempo. La mayoría de modelos dinámicos en estructuras se reducen básicamente a sistemas de este tipo. Cuando el periodo de movimiento de una estructura coincide con el periodo del suelo se produce resonancia, en la que el suelo y estructura actúan como conjunto provocando mayor amplificación de fuerzas dinámicas sobre la edificación”¹⁰.

7.1.3.3 Ductilidad

Es la habilidad que un material posee para deformarse plásticamente, es decir, la relación entre la deformación ultima y la deformación en el punto de cedencia.

Figura 4. Ductilidad



Fuente: Josef Farbiarz F. Diseño sismo resistente

Para Corzo Véliz¹¹ un sistema estructural es dúctil cuando es capaz de soportar deformaciones importantes bajo carga prácticamente constante, sin alcanzar niveles excesivos de daños.

¹⁰ CORZO VÉLIZ, Kenny Rolando. Diseño de un modelo estructural con el programa Etabs. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería civil. 2005. p.15

¹¹ Ibid., p. 6

De las curvas carga-deformación para el primer ciclo de carga, no puede conocerse un comportamiento dúctil en ciclos posteriores, puesto que en los ciclos siguientes de carga pueden producirse deterioros de rigidez y resistencia (ciclos de histéresis).

Para evaluar la ductilidad se usa el llamado factor de ductilidad (μ), que se define como el cociente entre la deformación necesaria para alcanzar la falla (deformación máxima, δ_{max}) dividida por la deformación correspondiente al límite elástico ($\delta_{elast.}$)

7.1.3.4 Acelerograma

De acuerdo con Carlos Alberto Bermúdez, “Un acelerograma es una serie temporal o cronológica de valores de aceleración que se han registrado durante un sismo. En un registro de este tipo se puede distinguir la máxima aceleración que se alcanzó y la duración de la excitación sísmica”¹².

7.1.4 Espectros de respuesta

Luis Enrique García¹³ plantea que el espectro de respuesta es la representación gráfica de los máximos valores que puede tener el desplazamiento, la velocidad o la aceleración, en función del periodo de vibración T y del coeficiente de amortiguamiento crítico ξ .

7.1.4.1 Rigidez

La rigidez la define Luis Enrique García¹⁴ como la relación de las fuerzas externas ya sean estáticas o dinámicas y las relaciones que ellas inducen en el cuerpo, es decir es la relación entre las fuerzas y los desplazamientos y usualmente se

¹² BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Método de la fuerza horizontal equivalente. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. p.2.

¹³ GARCIA REYES, Luis Enrique. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Bogotá: Universidad de los Andes, 1998. p.95.

¹⁴ *Ibíd.*, p. 8.

denomina por la letra **k**. También se puede decir que la rigidez de un cuerpo es la fuerza (o momento) que es necesario aplicar a éste para producir una deformación (o rotación) unitaria.

7.1.4.2 Amortiguamiento

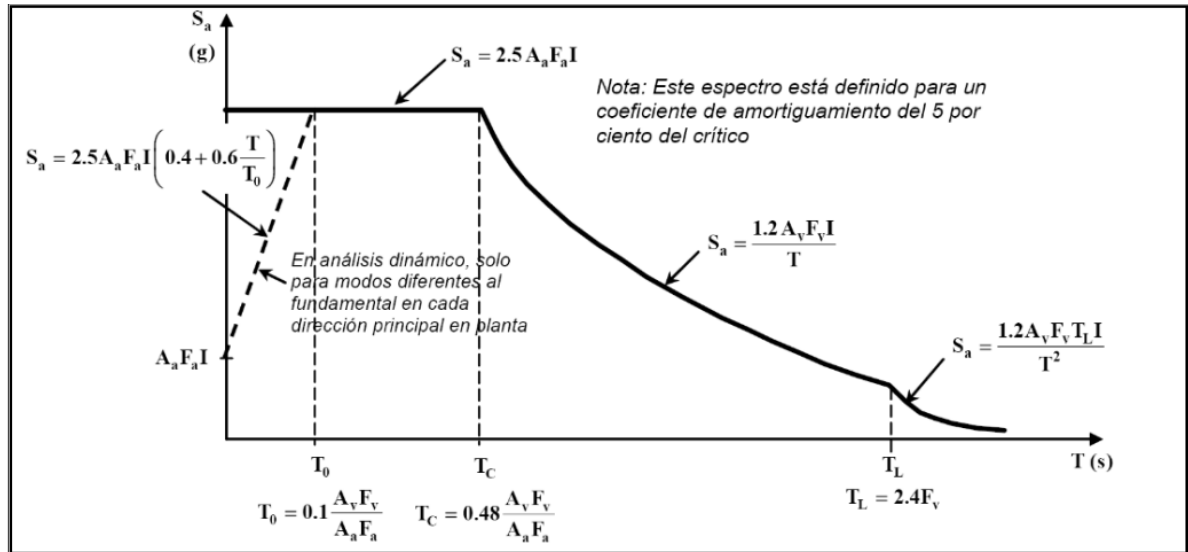
“En general en todo cuerpo en movimiento, este último tiende a disminuir con el tiempo. La razón de esta disminución está asociada con una pérdida de la energía presente en el sistema. Esta pérdida de energía es producida por fuerzas de amortiguamiento o de fricción que obran sobre el sistema. La energía, ya sea cinética o potencial, se transforma en otras formas de energía tales como calor o ruido”¹⁵.

7.1.4.3 Espectro de diseño

La amenaza o peligrosidad sísmica de un sitio se define normalmente mediante espectros de diseño. De acuerdo con el reglamento NSR-10, estos quedan determinados por el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva A_a , el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva A_v , el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, F_a , el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios F_v y el coeficiente de importancia I .

¹⁵ *Ibíd.*, p.11.

Figura 5. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción g.



Fuente: Título A.2.6. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

7.1.5 Elementos constitutivos del análisis

7.1.5.1 Rigidez de piso

Cabe resaltar el concepto de rigidez de piso (R_i) de Carlos Vallecilla quien lo define como “la relación que existe entre la fuerza cortante en el piso (i) dividida por el desplazamiento relativo Δ_i en el entrepiso”¹⁶.

7.1.5.2 Centro de gravedad (masa) c_g

“Punto en el que se supone está concentrado todo el peso (masa) de un cuerpo. Su posición se obtiene a partir de los principios de la estática, es de interés recordar que la misma fuerza para acelerar un cuerpo en el espacio sin gravitación que para acerarlo en una superficie horizontal sin rozamiento, en la tierra, pues su masa es la misma en ambos lugares. Una consecuencia de esta afirmación es que el centro de masa y el centro de gravedad coinciden en campos gravitacionales iguales”¹⁷.

¹⁶ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Fuerzas sísmicas principios y aplicaciones. Bogotá: Bauen. 2003. p. 58.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 66

7.1.5.3 Centro de rigidez (CR)

“Punto en el que es necesario aplicar una fuerza para producir una traslación uniforme de todos los puntos de un cuerpo, sin que haya rotación”¹⁸.

7.1.5.4 Excentricidad

Vallecilla¹⁹ también define la excentricidad como la distancia que existe, en un mismo plano, entre el centro de gravedad (X_{cg} , Z_{cg}) y el centro de rigidez (CR). Así mismo es la distancia que hay en el centro de rigidez (CR) y el punto de aplicación de la fuerza cortante de piso (C).

7.1.5.5 Torsión de diseño

“Es la suma del momento torsor resultado del producto de la fuerza cortante de piso por la excentricidad más el momento de torsión accidental”²⁰.

7.1.5.6 Deriva

De acuerdo con la NSR-10 “se entiende por deriva el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación”²¹.

7.1.5.7 Cargas

Las acciones exteriores se pueden clasificar según su dirección:

Cargas gravitatorias: dirección vertical, relacionadas con el peso del edificio y de los objetos que contiene. Producen flexiones en los elementos horizontales y compresiones en los elementos verticales.

- Carga muerta: D
- Carga viva: L

¹⁸ *Ibíd.*, p. 67

¹⁹ *Ibíd.*, p. 67.

²⁰ *Ibíd.*, p. 67

²¹ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Documentación. Requisitos generales de diseño sismo resistente. NSR-10 A.3.4.2.1 Bogotá: El Instituto, 2010. A73.

- Peso propio de la estructura: PPIO
- Carga viva de cubierta: LR
- Carga muerta para vigas de rigidez: DRIG
- Carga viva para vigas de rigidez: LRIG

Cargas horizontales: Debida a agentes ambientales (viento, olas, impactos, seísmos) y empujes. Producen compresiones en los elementos horizontales y flexiones en los elementos verticales.

- Sismo en X: SX
- Sismo en Y: SY

7.1.6 Método de la fuerza horizontal equivalente

Cabe resaltar la definición de Carlos Ramiro Vallecilla²²: El método de la fuerza horizontal equivalente supone que las estructuras vibran según el primer modo de vibración, o modo fundamental. Por otra parte sustituye el carácter dinámico de las sollicitaciones sísmicas por fuerzas estáticas las cuales representan el sismo (E), equivalentes aplicadas en los entrepisos de los edificios, en la base de la estructura (cortante basal, V_s), en donde se concentra gran parte de su masa.

7.1.6.1 Criterios para la aplicación FHE

De acuerdo con la NSR-10²³, el método de la fuerza horizontal equivalente se puede emplear en las siguientes estructuras:

- Todas las edificaciones, regulares e irregulares, en las zonas de amenaza sísmica baja.

²² *Ibíd.*, p. 121

²³ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Documentación. Requisitos generales de diseño sismo resistente. NSR-10 A.3.4.2.1 Bogotá: El Instituto, 2010. A45

- Todas las edificaciones, regulares e irregulares, pertenecientes al grupo de uso I, localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia.
- Edificaciones regulares, de 20 niveles o menos y 60 m de altura o menos medidos desde la base, en cualquier zona de amenaza sísmica, exceptuando edificaciones localizadas en lugares que tengan un perfil de suelo tipo D, E o F, con periodos de vibración mayores de $2T_c$.
- Edificaciones irregulares que no tengan más de 6 niveles ni más de 18 m de altura medidos a partir de la base.
- Estructuras flexibles apoyadas sobre estructuras más rígidas que cumplan los requisitos de A.3.2.4.3. del Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10.

7.1.6.2 Periodo fundamental de la edificación

Carlos Alberto Bermúdez²⁴ define el período fundamental de una estructura como (...) el tiempo que esta toma en dar un ciclo completo cuando experimenta vibración no forzada. Su determinación es primordial porque de él depende la magnitud de la fuerza sísmica que experimentará la estructura. Por lo tanto se han desarrollado fórmulas que permiten hacer un cálculo aproximado del período del edificio con el propósito de estimar las fuerzas sísmicas.

La NSR-10²⁵ presenta ecuaciones de cómo obtener el periodo fundamental, T , a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica, en la dirección bajo

²⁴ BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Método de la fuerza horizontal equivalente. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. p.5.

²⁵ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Documentación. Requisitos generales de diseño sismo resistente. NSR-10. Bogotá: El Instituto, 2010.p.D64.

consideración, de acuerdo con los principios de la dinámica estructural, utilizando un modelo matemático linealmente elástico de la estructura.

Ecuación 1. Periodo fundamental de la edificación.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i \delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (f_i \delta_i)}}$$

Fuente: Ecuación A.4.2-1. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10.

Donde:

- Los valores de f_i representan unas fuerzas horizontales distribuidas aproximadamente
- Las deflexiones horizontales, δ_i , deben calcularse utilizando las fuerzas horizontales f_i .
- m_i : masa de cada piso.

Alternativamente también se presenta la Ecuación A.4.2-3 de NSR-10, presentada aquí como Ecuación 2:

Ecuación 2. Periodo fundamental aproximado.

$$T_a = C_t h^\alpha$$

Fuente: Ecuación A.4.2-3. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

Donde:

- T_a = Período fundamental aproximado

- C_t = Coeficiente que depende del tipo de edificio según Tabla A.4.2-1, NSR-10
- h = Altura del edificio
- α = Exponente que depende del tipo de edificio según Tabla A.4.2-1, NSR-10

7.1.6.3 Determinación del cortante en la base

De acuerdo con Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente “El cortante sísmico en la base, V_s , equivalente a la totalidad de los efectos inerciales horizontales producidos por los movimientos sísmicos de diseño, en la dirección en estudio”²⁶, se obtiene aplicando la Ecuación A.4.3-1 de NSR-10, presentada aquí como Ecuación 3.

Ecuación 3. Cortante en la base.

$$V_s = S_{ag}M$$

Fuente: Ecuación A.4.3-1. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

Donde:

- V_s = Cortante sísmico en la base.
- S_a = Aceleración, en términos de la gravedad, leída en el espectro de diseño para T_a .
- g = Aceleración de la gravedad.
- M = Masa total del edificio.

7.1.6.4 Distribución en altura del cortante en la base

Para efectos de distribuir el cortante de base en sentido vertical es necesario calcular para cada piso el coeficiente C_{vx} con la Ecuación A.4.3-3 de NSR-10.

²⁶ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Documentación. Requisitos generales de diseño sismo resistente. NSR-10. Bogotá: El Instituto, 2010.p.A65.

Ecuación 4. Coeficiente C_{vx} .

$$C_{vx} = \frac{m_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i h_i^k)}$$

Fuente: Ecuación A.4.3-3. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

Donde:

- C_{vx} = Coeficiente que indica qué parte del cortante de base le corresponde a cada piso
- m_i = Masa que está ubicada en el nivel i
- m_x = Masa que está ubicada en el nivel x
- h_i = Altura, medida desde la base, del nivel i
- h_x = Altura, medida desde la base, del nivel x
- K = Exponente relacionado con el período fundamental.

A partir del coeficiente C_{vx} se calcula la fuerza horizontal para cada piso mediante la siguiente Ecuación:

Ecuación 5. Fuerza sísmica horizontal.

$$F_x = C_{vx} V_s$$

Fuente: Ecuación A.4.3-2. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

Donde:

- F_x = Fuerza sísmica horizontal en el nivel x
- C_{vx} = Coeficiente que indica qué parte del cortante de base le corresponde al piso x
- V_s = Cortante sísmico en la base

7.1.6.5 Deriva de piso e índice de deriva de piso

La deriva de piso es la deformación relativa que sufre un piso en particular por la acción de una fuerza horizontal. Se calcula restando del desplazamiento del

extremo superior el desplazamiento del extremo inferior del piso. No está reglamentado cuál es la deriva máxima que puede experimentar un edificio; lo que sí está determinado es que el índice de deriva, es decir, la relación entre la deriva y la altura de piso no debe ser mayor al 1% para el caso pórticos de concreto o de acero. Este límite protege a los elementos no estructurales frágiles que se verían muy afectados en un sismo si la estructura es muy flexible.

7.1.7 Método del análisis dinámico elástico

De acuerdo con Bazán y Meli²⁷ el análisis sísmico dinámico, además de las características de rigidez que se emplean en un análisis estático, incluyen propiedades inerciales y de amortiguamiento, es decir, el análisis dinámico es más preciso porque incorpora información ignorada.

“El análisis dinámico de los edificios implica conocer ciertas propiedades que pueden calcularse a partir de un modelo matemático que represente su comportamiento estructural. En un proceso iterativo que parte de las fuerzas que proporciona el método de la fuerza horizontal equivalente se puede establecer cuál es el período del modo fundamental de vibración y cuál es su forma modal. El vector de forma obtenido se usa para calcular el factor de participación modal y el coeficiente de masa efectiva modal que son vitales para determinar la respuesta sísmica”²⁸.

El análisis dinámico se divide en dos procedimientos:

- Procedimientos espectrales.
- Procedimientos de análisis cronológico.

²⁷ BAZÁN, Enrique y MELI, Roberto. Diseño sísmico de edificios. México: Limusa S.A, 1998. P237.

²⁸ BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Introducción al Análisis Dinámico de Estructuras. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. p.1. Cap. VIII.

7.1.7.1 Criterios de aplicación método del análisis dinámico elástico

De acuerdo con la NSR-10²⁹, el método del análisis dinámico elástico se puede emplear en las siguientes estructuras:

- Edificaciones de más de 20 niveles o de más de 60 m de altura.
- Edificaciones que tengan irregularidades verticales de los tipos 1aA, 1bA, 2A y 3A, tal como se definen en A.3.3.5. del Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- Edificaciones de más de 5 niveles o de más de 20 m de altura, localizadas en zonas de amenaza sísmica alta, que no tengan el mismo sistema estructural en toda su altura, con la excepción de los prescritos en A.3.2.4.3. del Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- Estructuras, regulares o irregulares, localizadas en sitios que tengan un perfil de suelo D, E o F y que tengan un período mayor de $2T_c$.

7.1.7.2 Número de modos de vibración

Según la NSR-10 “Deben incluirse en el análisis dinámico todos los modos de vibración que contribuyan de una manera significativa a la respuesta dinámica de la estructura”³⁰. Para el número de modos empleados se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

²⁹ REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Documentación. Requisitos generales de diseño sismo resistente. NSR-10. Bogotá: El Instituto, 2010.p.A45.

³⁰ Ibíd.p. A70

Ecuación 6. Numero de modos de vibración.

$$\bar{M}_j = \sum_{m=1}^p \bar{M}_{mj} \geq 0.90 M \quad \bar{M}_{mj} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij}^m \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \left(\phi_{ij}^m \right)^2}$$

Fuente: Ecuación A.5.4-1. y A.5.4-2. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

Se considera que es suficiente cuando la suma de la masa modal de los modos incluidos en el análisis alcanza o supera el 90% de la masa total de la estructura, la cual participa en la generación de fuerzas inerciales.

7.1.7.3 Cálculo del cortante modal en la base

Debe determinarse con la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Cortante modal en la base.

$$V_{mj} = S_{am} g \bar{M}_{mj}$$

Fuente: Ecuación A.5.4-3. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10

Donde:

- \bar{M}_{mj} = Números de modos de vibración
- S_{am} = Es el valor leído del espectro elástico de aceleraciones
- S_{α} = El período de vibración T_m correspondiente al modo de vibración m .

7.1.7.4 Fuerzas de diseño en los elementos

Para obtener las fuerzas de diseño de los elementos, se utilizan las fuerzas sísmicas internas máximas en los elementos, F_s , debidamente ajustadas de acuerdo con los requisitos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente A.5.5.3.

7.2 MARCO CONCEPTUAL

En el desarrollo del trabajo de investigación sobre el *análisis comparativo de las variaciones económicas entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500*, inicialmente se hace necesario, para cada edificación realizar el análisis estructural, es decir la determinación de los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre las estructuras regulares de 3, 8 y 16 pisos, desarrolladas en un espacio de 25.20m de ancho por 25.00m de largo con un área de 630m². Su conformación geométrica en planta está dada por una distribución de 5 ejes columnas equidistantes a 6.30m entre ellos en sentido longitudinal, 6 ejes equidistantes 5.00m entre ellos en sentido transversal y una altura para cada piso de 3.00m.

Dicho análisis se ejecutara por medio de dos métodos avalados por la norma NSR-10. El primero es el análisis lineal estático o método de la fuerza horizontal equivalente, el cual según la definición de Carlos Vallecilla³¹ supone que las estructuras vibran según el primer modo de vibración, o modo fundamental al sustituir el carácter dinámico de las sollicitaciones sísmicas por una fuerza estática. El segundo es el análisis dinámico, Carlos Bermúdez³² lo expone como el estudio del comportamiento dinámico de las estructuras y la consideración de los diferentes modos de vibraciones que se presentan en la misma.

El análisis se limitara al cumplimiento de la rigidez establecida por la norma sismo resistente, el concepto de rigidez definida por Luis Enrique García³³ es la relación

³¹ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Fuerzas sísmicas principios y aplicaciones. Bogotá: Bauen. 2003. p. 121.

³² BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Introducción al Análisis Dinámico de Estructuras. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. p.1. Cap. VIII.

³³ GARCIA REYES, Luis Enrique. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Bogotá: Universidad de los Andes, 1998. p.95.

de las fuerzas externas ya sean estáticas o dinámicas y las relaciones que ellas inducen en el cuerpo, es decir es la relación entre las fuerzas y los desplazamiento. Luego entonces, se busca que las derivas entendidas según Vallecilla como “el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación”³⁴, no sobrepasen el límite del 1% de la altura entre pisos contiguos de la edificación.

Obtenidas tanto las dimensiones como los valores de esfuerzos internos y tensiones en cada uno de los elementos estructurales que conforman el sistema de resistencia sísmica, es decir, elementos viga y elementos columna, bajo los parámetros de rigidez antes descritos por medio de cada uno de los métodos relacionados, se procede a establecer las diferencias mediante un análisis comparativo de dichos valores, se entiende que a menores dimensiones, esfuerzos internos y tensiones menores serán las cantidades de concreto, acero y mano de obra que se requerirán para la construcción de las edificaciones evaluadas y en consecuencia se reducirá su costo.

³⁴ VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Fuerzas sísmicas principios y aplicaciones. Bogotá: Bauen. 2003. p. 194.

7.3 MARCO JURIDICO

El marco legal que concierne al tema de investigación sobre *análisis comparativo de las variaciones económicas entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500* relaciona los referentes internacionales, constitucionales y legales que permiten situarla en sus aspectos institucionales.

En tal sentido y de acuerdo a su orden de jerarquía, en primera instancia la Constitución Política en cuanto a la expedición de normas y leyes, refiere lo siguiente: “*ARTICULO 200. Corresponde al Gobierno, en relación con el Congreso: 1. Concurrir a la formación de las leyes, presentando proyectos por intermedio de los ministros, ejerciendo el derecho de objetarlos y cumpliendo el deber de sancionarlos con arreglo a la Constitución.*”³⁵.

Por medio del Artículo 200, se permitió la reglamentación para el desarrollo de construcciones e intervenciones para lograr edificaciones sismo-resistentes, el Ministerio y Viceministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial junto la Dirección del Sistema Habitacional y la elaboración técnica por parte de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, se desarrolló el Reglamento De Construcción Sismo Resistente NSR-10, el cual fue radicado al congreso y revisado por la Comisión Asesora Permanente del Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, para su aprobación mediante el Decreto 929 del 19 de marzo de 2010.

La intención de comparar dos métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica (método de la fuerza horizontal equivalente y método del análisis dinámico

³⁵CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA, Del Gobierno. EN: Constitución Política De Colombia. 13ed. Bogotá: Temis S.A., 2011. p.107

elástico), sugiere el considerar el cumplimiento de los parámetros que la norma dicta sobre la materia, en este caso *El Reglamento De Construcción Sismo Resistente NSR-10*, presenta los siguientes títulos que establecen los criterios y requisitos mínimos en los cuales se debe reglamentar el presente trabajo de grado:

- Titulo A: Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente, en el cual se establecen los requisitos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones nuevas, con el fin de que sean capaces de resistir las fuerzas que les impone la naturaleza o su uso y para incrementar su resistencia a los efectos producidos por los movimientos sísmicos. En especial se contemplan los capítulos:

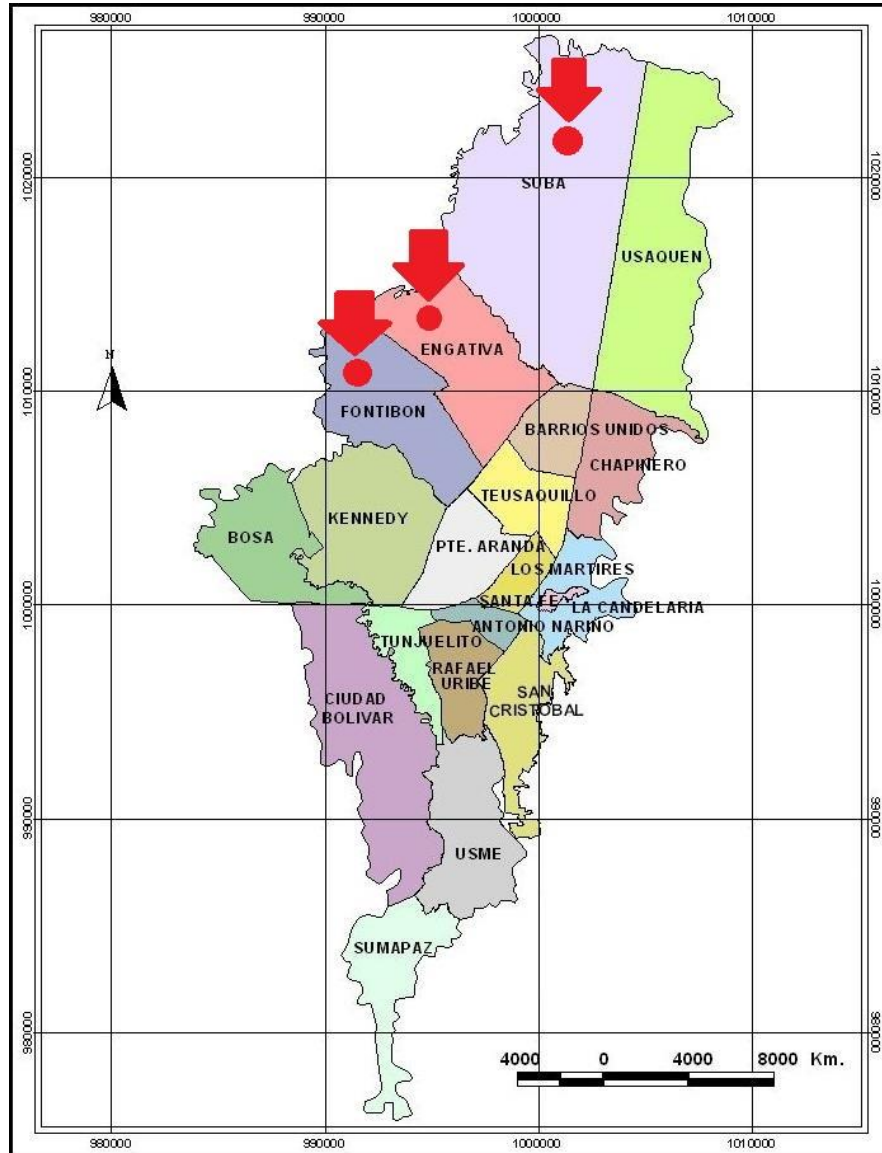
Capitulo A.4: Método de la fuerza horizontal equivalente.

Capitulo A.5: Método del análisis dinámico.

- Titulo B: Cargas, en el cual se establecen las cargas que deben emplearse en el diseño de edificaciones, diferentes a las fuerzas o efectos que le imponen el sismo.
- Titulo C: Concreto estructural, constituye todos los requisitos mínimos para el diseño y construcción de elementos de concreto estructural.

7.4 MARCO GEOGRAFICO

Figura 6. Localidades de Bogotá D.C.



Fuente: Bogota.gov.co

El análisis comparativo de las variaciones económicas entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico, se pretende evaluar con edificaciones 3, 8 y 16 ubicadas en la zona de respuesta sísmica lacustre 500, según Figura 2 Zona de respuesta sísmica. Bogotá D.C., esta zona abarca una área

importante en el occidente de la ciudad, comprende localidades como: Engativá, Fontibón, y Suba como lo señala la Figura 5.

La zonas de respuesta sísmica denominada lacustre 500, corresponde a un tipo de suelos blandos, arcillas limosas o limos arcilloso, este tipo de suelos posee un espesor que llega entre 300m y 500m de profundidad.

De acuerdo con el informe final de la zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones se denomina: “Depósitos Fluvio – Lacustre (Terraza Alta, Qta): Llamada también Formación Sabana por Hubach (1957) y Helmens (1990) este depósito está constituido por arcillas plásticas con lentes de arena suelta e intercalaciones de cenizas volcánicas, en algunos sectores se presentan varios niveles de turbas hasta de 1 m de espesor”³⁶.

³⁶ Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones. Documentación. Informe final. Volumen1 Bogotá: El Instituto, 2010. p.33.

8. DISEÑO METODOLÓGICO

8.1 ENFOQUE CUANTITATIVO

El análisis comparativo de las variaciones económicas entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500, tema de investigación del presente trabajo de grado se debe realizar mediante el enfoque cuantitativo, ya que se usa la recolección de datos para probar una hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico para establecer estándares de comportamiento.

Utilizando el diseño de investigación adecuada al enfoque cuantitativo, se brinda la posibilidad de evaluar puntos específicos de fenómenos tales como:

- Determinación de las fuerzas sísmicas que actúan sobre las edificaciones de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.
- Determinar los desplazamientos y derivas que presentan las estructuras evaluadas, mediante cada uno de los métodos
- Determinar los esfuerzos que presentan cada uno de los elementos estructurales que conforman el sistema de resistencia sísmica por cada método sugerido.
- Determinar las variaciones económicas en cuanto cantidades de acero y concreto que presentan las estructuras empleando el análisis por el método de fuerza horizontal equivalente y por el método de análisis dinámico elástico en edificaciones de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.

El procedimiento que se lleva a cabo, es hipotético-deductivo, teniendo como pasos esenciales:

- La observación del fenómeno a estudiar: la investigación parte de una realidad existente, los métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica al ser muy aproximados, carecen de ciertas características que permitan aplicarlos a tipos muy específicos de estructuras.
- Hipótesis: la derivación de hipótesis se realizó de teorías ya existentes y del fenómeno observado.
- Diseño de Investigación: se desarrollará un procedimiento para evaluar el método de análisis sismo resistente más propicio, según las características con que cuenta cada estructura, el cual consiste en modelar individualmente los métodos de diseño, con el fin establecer su costo, ya que se determinaría teóricamente las cantidades de acero y concreto.
- Concluido el proceso por medio de la modelación, se espera establecer cuál es el método de análisis más adecuado para realizar diseños estructurales óptimos, confiables y responsables con el medio ambiente cumpliendo los requisitos mínimos de Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-10.

8.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo pretende establecer las diferencias en los costos en la construcción de edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500 por medio de la investigación comparativa de datos obtenidos en los análisis realizados, ya que se realizaría una comparación exhaustiva con los dos métodos de análisis mencionados, para así analizar y sintetizar sus diferencias y similitudes.

Si bien la dificultad de los trabajos comparativos está en establecer correctamente los criterios con los que se hará la comparación, el procedimiento de la comparación en sí, se desarrolla mediante un procedimiento relativamente simple y corresponde a la determinación de las cantidades de concreto y acero de refuerzo requeridos para la construcción de las edificaciones propuestas en función de los resultados arrojados en el análisis y diseño por el método de fuerza horizontal equivalente y por el método de análisis dinámico elástico.

8.3 FASES DE LA INVESTIGACION

En el siguiente ítem se expondrá las etapas que permiten al investigador aplicar el diseño metodológico, se enumerará las fases que abarcan por completo los objetivos específicos.

8.3.1 Fase I: Parámetros geométricos y sísmicos

Se determinan la geometría y los parámetros de diseño sísmico de las edificaciones analizar, teniendo en cuenta la construcción Colombiana actual en zona de respuesta sísmica lacustre 500, logrando así un mayor acercamiento entre la modelación y la realidad nacional. Por otro parte, para establecer los parámetros sísmicos que afectan a las estructuras se tendrá en cuenta lo expuesto en el marco teórico y lo señalado en el marco jurídico, esto con el fin de certificar el cumplimiento de normas sismo-resistentes vigentes.

Esta fase contendrá:

- Planos estructurales digitalizados en Autocad, estos planos contendrán: conformación geométrica en planta está dada por una distribución de 5 ejes columnas equidistantes a 6.30m entre ellos en sentido longitudinal, 6 ejes

equidistantes 5.00m entre ellos en sentido transversal y una altura para cada piso de 3.50m.

- Parámetros sísmicos según disposiciones establecidas en el título A de la norma Sismo Resistente y en el decreto 523 de 2010 que establece la microzonificación sísmica de Bogotá: avalúos de carga, masa de la edificación, espectro sísmico de diseño, excentricidades, pre-dimensionamiento, pseudo-aceleración, periodo fundamental de vibración de la estructura y cortante basal.

En esta fase se realizará la recolección de todos los datos calculados y arrojados por los parámetros sísmicos antes mencionados, mediante formatos previamente establecidos para posteriormente procesar la información de manera ordenada y correcta.

8.3.2 Fase II: Análisis métodos de resistencia sísmica

El análisis se llevara a cabo por medio de la modelación de las estructuras en el software para análisis y diseño estructural ETABS 9.7.2, en el cual se debe ingresar todas las fuerzas tanto verticales (Carga muerta, viva y peso propio) como horizontales (sísmicas) y las respectivas combinaciones de carga que menciona la NSR-10.

ETABS³⁷ es un programa de análisis y diseño estructural basado en el método de los elementos finitos con características especiales para el análisis y diseño estructural de edificaciones. Este programa trabaja dentro de un sistema de datos ingresados, todo lo que se necesita es integrar el modelo dentro de un sistema de análisis y diseño con una versátil interface.

³⁷ QUIROZ TORRES, Luis Gabriel. Análisis y diseño de edificaciones con ETABS. Perú: Macro E.I.R.L. 2011. 389p.

El ETABS posee un módulo de presentación de datos de todo el análisis realizado, los correspondientes a desplazamientos serán los primeros que se procesaran con el fin determinar las derivas y verificar que estas no superen el 1% de la altura de cada piso, si esto llegara a suceder se procede a rigidizar la estructura mediante el aumento de secciones de columnas hasta conseguir cumplir el requisito antes señalado. Luego se extraerán de los resultados arrojados por el software los valores de los esfuerzos presentes en cada uno de los elementos vigas y columnas del modelo analizado.

En esta fase se realizará el análisis y posterior la recolección de todos los datos calculados y arrojados por el software ETABS, mediante formatos previamente establecidos para posteriormente procesar la información de manera ordenada y correcta.

8.3.3 Fase III: Procesamiento de la información

Con la modelación se identifican las diferencias en los resultados por cada uno de los métodos de análisis de resistencia sísmica, los cuales serán procesados mediante hojas de cálculo de Excel, con estas se realizaran las comparaciones y se establecerá cuáles son las variaciones económicas derivada de los dos métodos: método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.

Las variaciones estarán dadas por lo valores de cantidad de concreto requerida en función de las secciones de vigas y columnas que fueron utilizadas para el análisis y diseño estructural de las edificaciones y a su vez de la cantidad de acero necesaria para suplir las solicitaciones de esfuerzos de tensión presentes en los elementos estructurales.

8.4 TECNICAS E INSTRUMENTOS

Este trabajo grado pretende establecer las diferencias de los costos en la construcción de edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500 por medio de la comparación de datos obtenidos en los análisis realizados por medio de los métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica, fuerza horizontal equivalente y análisis dinámico elástico, por lo cual se hace obligatorio emplear la técnica de la observación estructurada.

Tanto la determinación de parámetros necesarios para los análisis realizados a las edificaciones, como la producción de los resultados y el procesamiento de los mismos para hacer posible la comparación, debe garantizar que cada uno de los aspectos que puedan afectar la obtención de datos veraces se encuentren dentro de los reglamentariamente establecidos.

En primera instancia se determina la geometría de las edificaciones a analizar, esta geometría da lugar a la elaboración de los planos estructurales que serán digitalizados en Autocad, asimismo, los planos contendrán la distribución de columnas, vigas, distancia entre ellas y las alturas de los pisos. Posteriormente, para establecer los parámetros sísmicos que afectan las estructuras se tendrán en cuenta las disposiciones establecidas en el título A de la norma Sismo-Resistente NSR-10, parámetros tales como, predimensionamiento, avalúos de carga, masa de la edificación, espectro sísmico de diseño, excentricidades, pseudo-aceleración, periodo fundamental de vibración de la estructura, entre otros, se realizara mediante hojas de cálculo en Excel.

Con los parámetros geométricos y sísmicos establecidos, se procede a realizar la modelación de las estructuras en el software para análisis y diseño estructural ETABS 9.7.2 y a ingresar todas las fuerzas tanto verticales (Carga muerta, viva y peso propio) como horizontales (sísmicas), por cada uno de los métodos de análisis

de resistencia sísmica. Los resultados arrojados por el software en lo referente a desplazamientos y esfuerzos serán procesados en hojas de cálculo de Excel para así determinar que la estructura cumpla con los requisitos de derivas y de resistencia.

Las diferencias en los resultados obtenidos por cada uno de los métodos igualmente serán manejados mediante hojas de cálculo de Excel, con estas se realizarán las comparaciones y se establecerá cuál de los dos métodos es más idóneo para el análisis y diseño de las edificaciones de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500.

La observación se realizará controlando los parámetros geométricos y sísmicos de cada edificación, mediante formatos en Excel predefinidos que se relacionan en el *Anexo 1*, lo que permitirá llevar un registro confiable del fenómeno observado.'

8.4.1 Variables

Dentro de las características del *análisis comparativo de las variaciones económicas entre el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos en zona de respuesta sísmica lacustre 500*, se pueden determinar mediante la observación estructurada, variables dependientes como; las fuerzas sísmicas que actúan sobre esta, el dimensionamiento de las vigas y columnas y los esfuerzos internos en cada uno de los elementos estructurales que conforman el sistema de resistencia sísmica, estas variables proporcionan información acerca de las variaciones económicas, las cuales se recolectan en los formatos pertinentes.

En principio dichas variables deben cuantificarse y en consecuencia establecer valores que permitan comparar los resultados obtenidos en los análisis realizados.

Se espera que estos valores varíen en función de los distintos métodos que se emplean para el análisis sísmico, los requisitos de desplazamientos y derivas del 1% de la altura de cada piso que se deben presentar a causa de las fuerzas sísmicas y la altura de las edificaciones propuestas para cada caso particular, se consideran como variables independientes.

8.4.2 Operacionalización de variables

A continuación se relacionan el conjunto de procedimientos que describen las actividades a desarrollarse para evaluar las variables de manera adecuada.

Las variables independientes se establecen cada una a partir de parámetros técnicos y normativos pertinentes para abarcar los rangos requeridos y/o más usuales en lo referente a la construcción y diseño de edificaciones presentes y permitidas en la zona lacustre 500. Se determinan alturas de edificaciones de 3, 8 y 16 pisos con altura de piso de 3.00m.

Tabla 2. Variables independientes e indicadores de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	INDICADOR DE VARIABLE	
Altura de la edificación	PISOS	ALTURA (m)
	3	9.00
	8	24.00
	16	48.00
Derivas en función de la altura de cada piso (3.00m)	ALTURA (m)	DERIVA MAX (%)
	9.00	1.0
	24.00	1.0
	48.00	1.0

Fuente: propia.

A partir de las variables independientes se establecen los valores de las variables dependientes, esto debido a que estas se encuentran en función de las primeras, las fuerzas sísmicas que actúan sobre la edificación son proporcionales al número de pisos y a la altura de los mismos, del peso mismo de la edificación y los efectos locales sísmicos de amplificación al igual que de la pseudo aceleración sísmica que a su vez se encuentra influenciados por la altura del edificio a estudiar, de igual manera el valor de las fuerzas sísmicas se encuentra afectado por el método de análisis.

El cortante basal es el producto de multiplicar la pseudo aceleración por el peso de la edificación, este se estima a partir del peso por metro cuadrado de placa de entrepiso y el número de pisos de cada edificio, el valor de $S_a=0.36$ se toma de del espectro de diseño correspondiente a la zona Lacustre 500 en la zona de meseta de periodos cortos ya que el periodo de vibración de las edificaciones estudiadas no supera el valor $T_L=1.87$.

Tabla 3 Estimación del cortante basal

CALCULO PARA ESTIMACION DEL CORTANTE BASAL			
	$A_{entrepiso} =$	652.78	m^2
	$QM =$	7.5	KN/m^2
	$P_i =$	4895.85	KN
	Peso aprox edificio	Seudo aceleracion S_a	P_{MINIMO}
	KN	g	KN
Vs 16 PISOS	78334	0.36	28200
Vs 8 PISOS	39167	0.36	14100
Vs 3 PISOS	14688	0.36	5287

Fuente: propia.

Para el caso de la dimensión de las columnas estas aumentan en la medida que las derivas excedan las permitidas y/o resistan las sollicitaciones de esfuerzos

requeridos, la dimensión inicial de las columnas se puede establecer en función de la carga axial que esta debe soportar.

Ecuación 8. Carga de falla de una columna sometida a carga axial.

$$F. de S.P = 0.85f_c (A_g - A_s) + f_y A_s$$

Fuente: Estructuras de concreto. Jorge Segura Franco.

Donde:

- F. de S. es el factor de seguridad para nuestro caso F. de S.=3.0.
- P es la carga axial de servicio de la columna.
- f_c la resistencia a compresión del concreto de la columna.
- A_g es el área bruta de la sección de columna.
- A_s es el área total del refuerzo en la columna.

Considerando que el área de refuerzo mínima en la sección de columna de concreto corresponde al 1% del área se sección bruta de la columna y estimando el peso por metro cuadrado de placa de entrepiso incluyendo carga muerta (7.5KN/m²) y carga viva (1.8KN/M²) en cada edificación se determina el área y dimensiones iniciales de las columnas.

Tabla 4 Predimensionamiento de columnas

CALCULO PARA PREDIMENSIONAMIENTO DE COLUMNAS					
A_{afere}	=	31.5	m ²	f'_c	= 28000 KN/m ²
QM+QV	=	9.3	KN/m ²	f_y	= 420000 KN/m ²
P_i	=	292.95	KN	ρ	= 0.01
		h	b	A_g	$P_{COLUMNA}$
		m	m	m ²	KN
COL 16 PISOS		0.75	0.75	0.5625	5205
COL 8 PISOS		0.55	0.55	0.3025	2799
COL 3 PISOS		0.35	0.35	0.1225	1134
					P_{MINIMO}
					KN
					4687
					2344
					879

Fuente: propia.

A continuación se relaciona el resumen de las variables dependientes.

Tabla 5. Variables dependientes e indicadores de variable.

VARIABLE DEPENDIENTE	INDICADOR DE VARIABLE	
Fuerzas sísmicas Vs	PISOS	RANGO
	3	5287 KN
	8	14100 KN
	16	28200 KN
Dimensión columnas	PISOS	RANGO
	3	35 cm
	8	55 cm
	16	75 cm

Fuente: propia.

Los valores anteriormente presentados constituyen un parámetro de magnitud a manera de orientación de los valores que podrían encontrarse durante el análisis y diseño más detallado, no son de obligatorio cumplimiento y las diferencias que puedan presentarse durante la obtención de los resultados no tienen mayor relevancia.

Los resultados variables tales como desplazamientos de la edificación y esfuerzos internos presentados en cada uno de los elementos estructurales arrojados por el software ETABS 9.7.2 serán manejados mediante formatos creados por el grupo de investigación que se encargará de la recolección de datos que facilitarán el posterior procesamiento de análisis de las hojas de cálculo para fines estadísticos y comparativos por medio de Excel.

9. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para mayor comprensión de análisis, resultados y conclusiones de esta investigación, se sugiere leer paralelamente el Anexo 1, el cual contiene las memorias de cálculo y los planos estructurales de cada una de las edificaciones regulares de 3, 8 y 16 pisos por el método de análisis dinámico elástico y por el método de la fuerza horizontal equivalente.

9.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ESTRUCTURAL

Las dimensiones que se muestran a continuación hacen parte del diseño definitivo de cada una de las edificaciones por el método de análisis dinámico elástico y por el método de la fuerza horizontal equivalente, después de evaluar las derivas totales obtenidas, debidamente ajustadas, las fuerzas sísmicas internas totales de los elementos y los requisitos propios del grado de capacidad de disipación de energía correspondiente del material, de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.3 de la NSR-10.

El procedimiento de diseño a la flexión de los elementos estructurales se realizó mediante el método de la resistencia última, el cual permite (...) estudiar el comportamiento de la estructura en el instante de falla; por tanto, si este instante se hace lo suficientemente mayor que el de su trabajo para las cargas que soporta normalmente, se podrá tener un diseño con factores de seguridad apropiados³⁸.

³⁸ SEGURA, Jorge. Estructuras de concreto. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p58.

9.1.1 Definición del sistema de resistencia sísmica

La definición del sistema de resistencia sísmica y las dimensiones tentativas, se realizan para evaluar las diferentes solicitaciones tales como: la masa de la estructura, las cargas muertas, las cargas vivas, los efectos sísmicos, entre otras. (Anexo 1)

9.1.1.1 Predimensionamiento

En función de la distribución arquitectónica, se ubica las columnas, teniendo en cuenta que la luz entre las mismas afectará de manera proporcional la altura de las vigas.

Tabla 6. Alturas y espesores mínimos para vigas no preesforzadas.

TABLA CR.9.5 — Alturas o espesores mínimos recomendados para vigas no preesforzadas o losas reforzadas en una dirección que soporten muros divisorios y particiones frágiles susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, a menos que se calculen las deflexiones				
Espesor mínimo, h				
	Simplemente apoyados	Con un Extremo continuo	Ambos Extremos continuos	En voladizo
Elementos	Elementos que soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes.			
Losas macizas en una dirección	$\frac{\ell}{14}$	$\frac{\ell}{16}$	$\frac{\ell}{19}$	$\frac{\ell}{7}$
Vigas o losas nervadas en una dirección	$\frac{\ell}{11}$	$\frac{\ell}{12}$	$\frac{\ell}{14}$	$\frac{\ell}{5}$

Fuente: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

El diseño estructural contempla pórticos monolíticos, es decir hay transferencia de momentos, por lo tanto de acuerdo con la Tabla 4 el espesor mínimo h corresponde: vigas o losas nervadas en una dirección: ambos extremos continuos.

$$h = \frac{6.3}{21} = 0.30 \rightarrow h = 0.40 \text{ m}$$

Se empleo la Ecuación 8, Carga de servicio o de trabajo en una columna del presente documento para su predimensionamiento obteniendo dimensiones iniciales de columnas de 0.75m x 0.75m para las edificaciones de 16 pisos, 0.55m x 0.55m para las edificaciones de 8 pisos y por ultimo 0.35m x 0.35m para las edificaciones de 3 pisos. Cabe aclarar que estas dimensiones fueron variando en función del requerimiento de derivas y de diseño hasta obtener las dimensiones correspondientes al diseño final.

9.1.1.2 Dimensionamiento

Tabla 7. Sistemas estructurales

SISTEMAS ESTRUCTURALES	
TIPOS DE SISTEMAS ESTRUCTURALES	EDIFICACIONES (m)
Combinado	16
Combinado	8
Pórticos	3

Fuente: Propia.

Para el diseño de las edificaciones de 16 y 8 pisos se requiero del diseño de muros estructurales para brindarle mayor rigidez a la estructura y por ende dar cumplimiento a los límites establecidos de derivas máximas, estos se dimensionaron y se distribuyeron de manera simétrica para no generar torsión a las edificaciones. Ver Anexo 1 (Planos estructurales).

El sistema de entrepiso está conformado por vigas o losas nervadas en una dirección. En este tipo de modelo los entrepisos se consideran diafragmas infinitamente rígidos en su propio plano. La masa de cada diafragma se considera concentrada en su centro de masa.

9.1.1.2.1 Vigas

Tabla 8. Dimensionamiento de vigas – Método FHE.

DIMENSIONAMIENTO VIGAS		
METODO FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE		
PISO	Bw (m)	H (m)
16	0.40	0.40
16	0.50	0.40
16	0.70	0.60
8	0.40	0.40
8	0.60	0.40
3	0.35	0.40
Viguetas	0.15	0.40

Fuente: Propia.

Tabla 9. Dimensionamiento de vigas – Método Análisis Dinámico Elástico.

DIMENSIONAMIENTO VIGAS		
METODO ANALISIS DINAMICO ELASTICO		
PISO	Bw (m)	H (m)
16	0.40	0.40
16	0.50	0.40
16	0.60	0.60
8	0.40	0.40
8	0.60	0.40
3	0.35	0.40
Viguetas	0.15	0.40

Fuente: Propia.

9.1.1.2.2 Columnas

Tabla 10. Dimensionamiento Columnas – Método FHE.

DIMENSIONAMIENTO COLUMNAS			
METODO FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE			
PISOS	UBICACION	Bw (m)	H (m)
16	Todas	1.10	1.10
8	Todas	0.80	0.85
3	Perimetrales	0.55	0.55
3	Restantes	0.50	0.50

Fuente: Propia.

Tabla 11. Dimensionamiento Columnas – Método Análisis Dinámico Elástico.

DIMENSIONAMIENTO COLUMNAS			
METODO ANALISIS DINAMICO ELASTICO			
PISOS	UBICACION	Bw	H (m)
16	Todas	0.80	0.80
8	Todas	0.50	0.75
3	Perimetrales	0.50	0.50
3	Restantes	0.45	0.45

Fuente: Propia.

9.1.1.2.3 Muros estructurales

Tabla 12. Dimensionamiento Muros Estructurales.

DIMENSIONAMIENTO MUROS ESTRUCTURALES		
METODO FHE Y ANALISIS DINAMICO ELASTICO		
PISOS	Bw (m)	L (m)
16	0.20	2.50
16	0.20	5.00
8	0.20	2.00

Fuente: Propia

9.1.1.3 Evaluación de solicitudes definitivas

Con las dimensiones de los elementos de la estructura definidas como resultado del paso anterior, se evalúan todas las solicitudes que pueden afectar la edificación de acuerdo con los requisitos del Título A y el Título B del Reglamento de la NSR-10.

La evaluación de cargas corresponde a los requisitos mínimos que deben cumplir las edificaciones con respecto a cargas que deben emplearse en su diseño, diferentes a las fuerzas o efectos que impone el sismo. Estas incluyen: el efecto gravitacional de la masa de los elementos estructurales, o peso propio, las cargas de acabados y elementos no estructurales, las cargas muertas y las cargas vivas. (Ver Anexo 1. Memorias de cálculo)

9.1.1.4 Obtención del nivel de amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño

Según la microzonificación sísmica de Bogotá, la zona de estudio se localiza en la zona de lacustre 500, con las siguientes consideraciones con base en el Código de construcciones sismo resistentes NSR-10 y el Decreto No. 523.

Tabla 13. Nivel de amenaza sísmica – Movimientos sísmicos de diseño.

NIVEL DE AMENAZA SISMICA - MOVIMIENTOS SISMICOS DE DISEÑO			
DATOS DE ENTRADA		Zona =	LACUSTRE-500
Municipio =	Bogotá D. C.	Fa =	0.95
Z. Amenaza Sísmica =	Intermedia	Fv =	2.7
Aa =	0.15	Grupo de Uso =	I
Av =	0.2	I =	1
Capacidad disipación =	DMO	Perfil del suelo =	F

Fuente: Propia.

9.1.2 Análisis sísmico de la estructura

9.1.2.1 Método de la Fuerza Horizontal Equivalente FHE

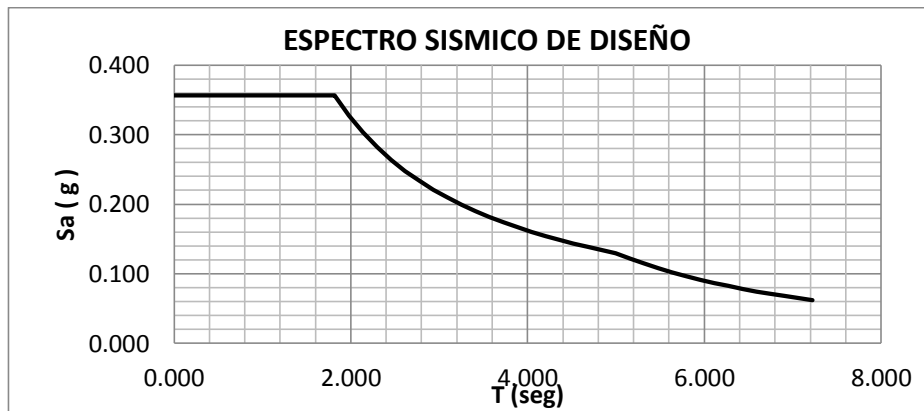
9.1.2.1.1 Periodo fundamental de la edificación

Se presentan las ecuaciones 1 y 2 en el marco teórico de cómo obtener el periodo fundamental T , a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica.

9.1.2.1.2 Fuerzas horizontales sísmicas equivalentes

En el marco teórico del presente informe se establecen las ecuaciones para la determinación del cortante en la base y la distribución del mismo en la altura, identificadas como ecuación 3 y ecuación 4 respectivamente.

Figura 7. Espectro sísmico de diseño – Lacustre 500



Fuente: Propia.

Figura 8. Análisis sísmico fuerza horizontal equivalente.

ANÁLISIS SISMICO									
Ameneza Sismica	INTERMEDIA		Metodo de Analisis	FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE					
	ZONA:	LACUSTRE-500							
$A_a=$	0.15	$T_a=$	1.00			$\Omega_0=$	2.5		
$A_v=$	0.20	$T=$	1.48	$S_a=$	$2.5 \cdot A_a \cdot F_a \cdot I=$	0.36	$R_0=$	5.0	
$F_a=$	0.95	$T_c=$	1.82				$\phi_a=$	1.0	
$F_v=$	2.70	$T_L=$	5.00				$\phi_p=$	1.0	
$I=$	1.00	$T_0=$	0.38	$C_T=$	0.049	$M=$	166790.01	$\phi_r=$	1.0
		$A_0=$	0.14	$\alpha=$	0.75	$V_s=$	59418.94	$R=$	5.0
		$K=$	1.3	$h=$	56.00			$R_c=$	5.0

Fuente: Propia.

9.1.2.1.3 Análisis de la estructura

El efecto de las fuerzas sísmicas, obtenidas de acuerdo con los ítems anteriores, correspondientes a cada nivel, se evalúan con una torsión accidental, en la cual se supone que la masa de todos los pisos está desplazada transversalmente, hacia cualquiera de los dos lados, del centro de masa calculado de cada piso, una distancia igual al 5 por ciento (0.05) de la dimensión de la edificación en ese piso, medida en la dirección perpendicular a la dirección en estudio.

Figura 9. Fuerza sísmica en la dirección X.

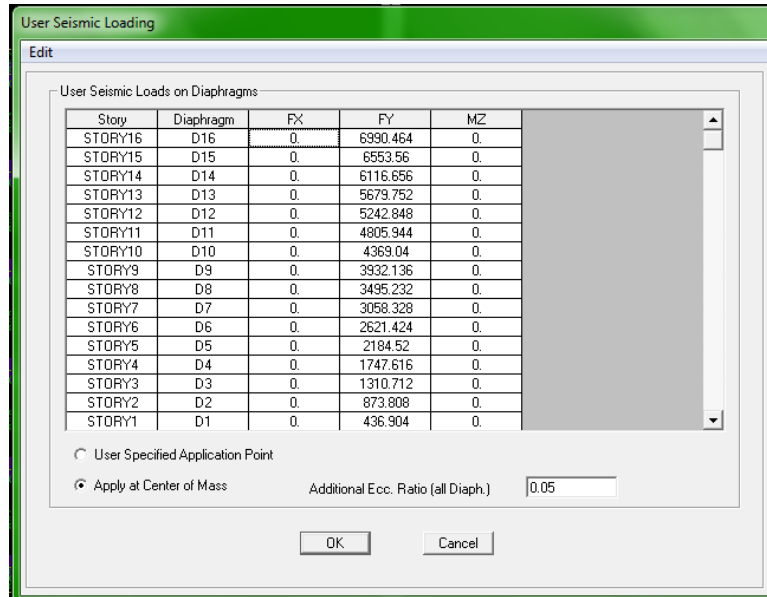
Story	Diaphragm	FX	FY	MZ
STORY16	D16	6990.464	0.	0.
STORY15	D15	6553.56	0.	0.
STORY14	D14	6116.656	0.	0.
STORY13	D13	5679.752	0.	0.
STORY12	D12	5242.848	0.	0.
STORY11	D11	4805.944	0.	0.
STORY10	D10	4369.04	0.	0.
STORY9	D9	3932.136	0.	0.
STORY8	D8	3495.232	0.	0.
STORY7	D7	3058.328	0.	0.
STORY6	D6	2621.424	0.	0.
STORY5	D5	2184.52	0.	0.
STORY4	D4	1747.616	0.	0.
STORY3	D3	1310.712	0.	0.
STORY2	D2	873.808	0.	0.
STORY1	D1	436.904	0.	0.

User Specified Application Point
 Apply at Center of Mass

Additional Ecc. Ratio (all Diaph.)

Fuente: Propia.

Figura 10 Fuerza sísmica en la dirección Y.



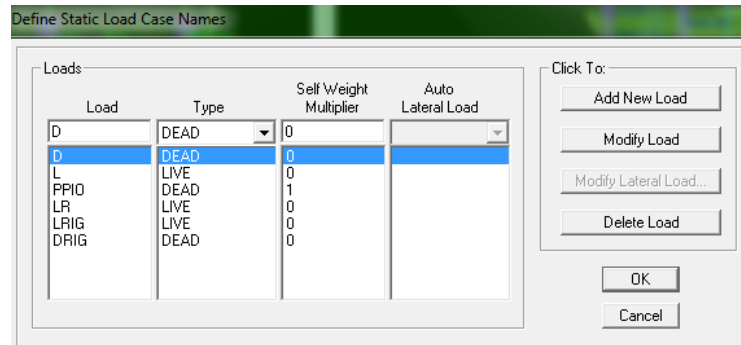
Fuente: Propia.

9.1.2.2 Método Análisis Dinámico Elástico

9.1.2.2.1 Definición de casos de carga

Se define los casos de carga estática con los cuales se va evaluar la estructura.

Figura 11. Casos de carga.

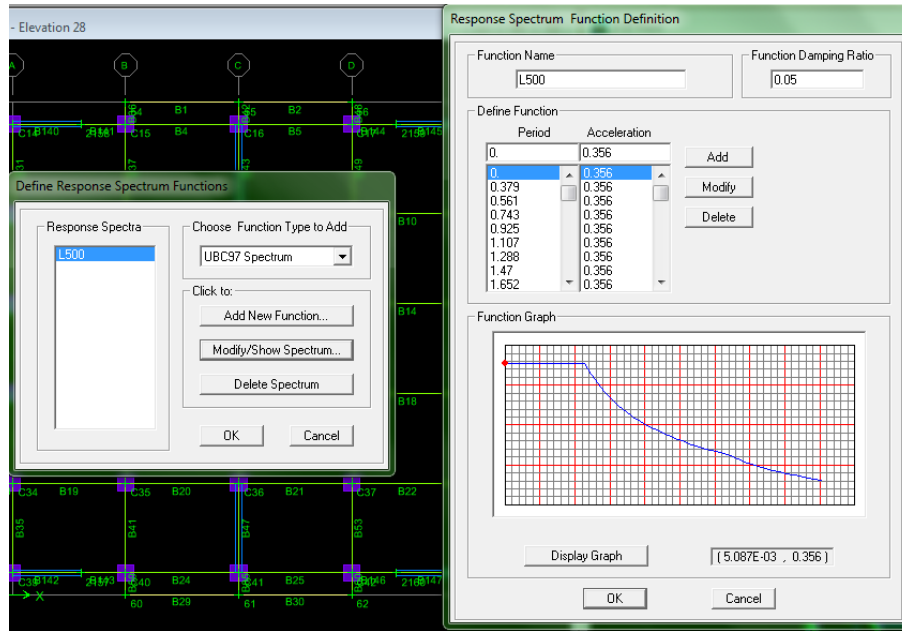


Fuente: Propia.

9.1.2.2.2 Espectro sísmico de diseño

De acuerdo con lo establecido en el nivel de amenaza sísmica y en los movimientos de diseño, se procede a realizar el espectro sísmico de diseño.

Figura 12. Espectro sísmico de diseño.

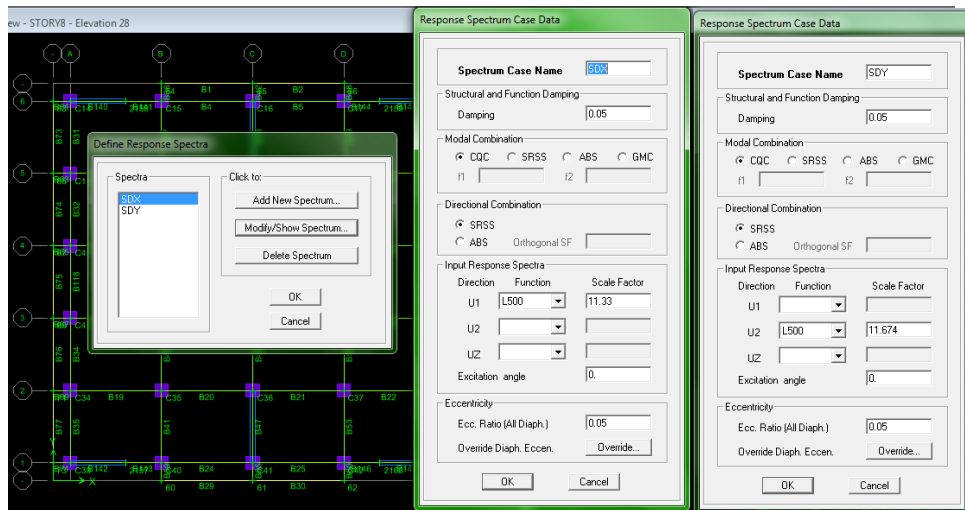


Fuente: Propia.

9.1.2.2.3 Casos espectrales de carga

Los casos espectrales de carga se realiza para *sismo x* y *sismo y*, ya que el coeficiente de importancia de la edificación $I = 1$, por lo tanto no se requiere casos espectrales adicionales para derivas.

Figura 13. Casos espectrales de carga, sismo X y sismo Y.

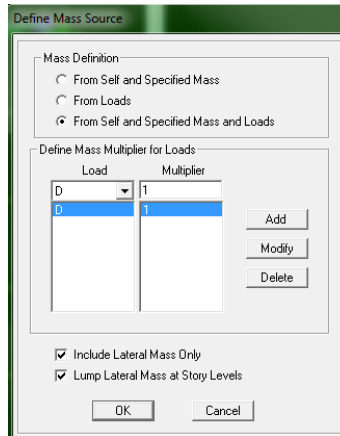


Fuente: Propia.

9.1.2.2.4 Fuentes de masa

Se define el 100 % de la carga muerta y del peso propio de la edificación.

Figura 14. Fuentes de masa

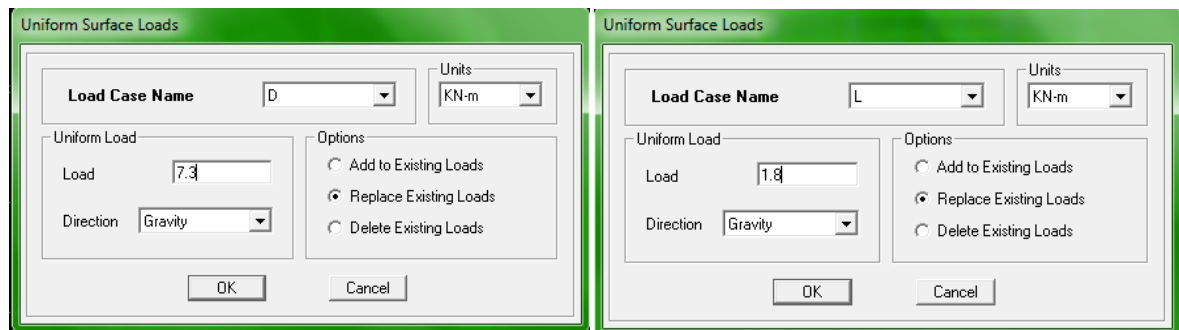


Fuente: Propia

9.1.2.2.5 Carga de losas y vigas de rigidez

De acuerdo con el avalúo de cargas, se procede a insertar la carga viva y muerta para las losas y vigas de rigidez.

Figura 15. Carga de losas y vigas de rigidez.

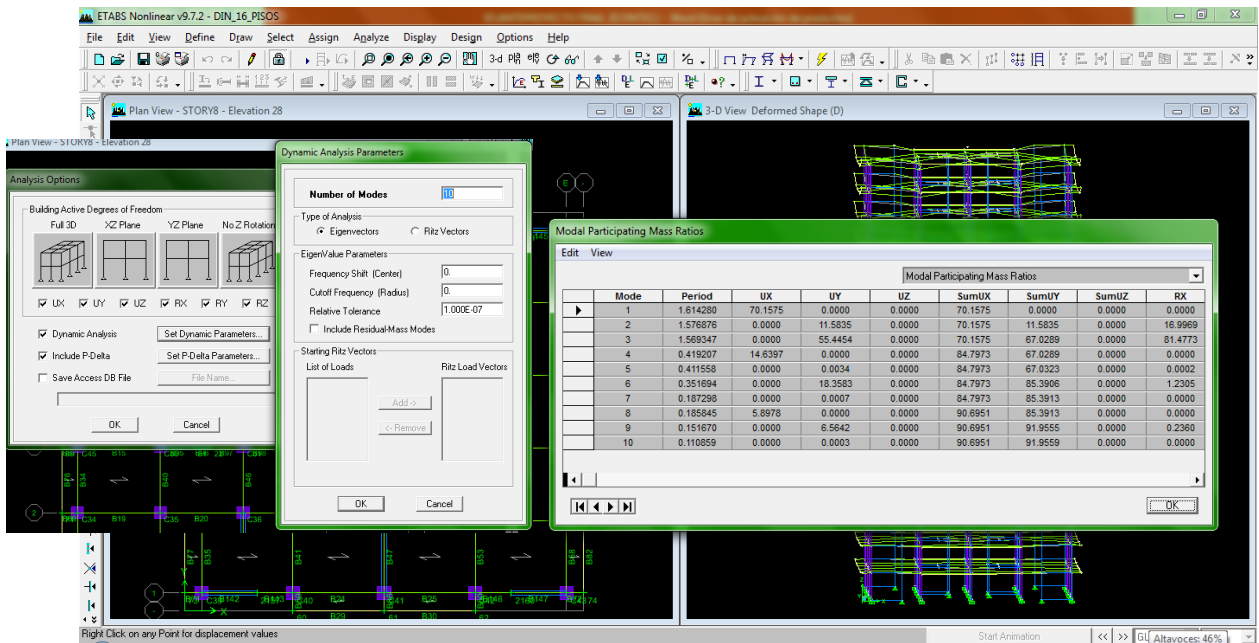


Fuente: Propia.

9.1.2.2.6 Numero de modos de vibración

El número de modos empleados debe incluir por lo menos el 90% de la masa participante de la estructura.

Figura 16. Modos de vibración.



Fuente: Propia.

9.1.2.2.7 Ajuste de los resultados

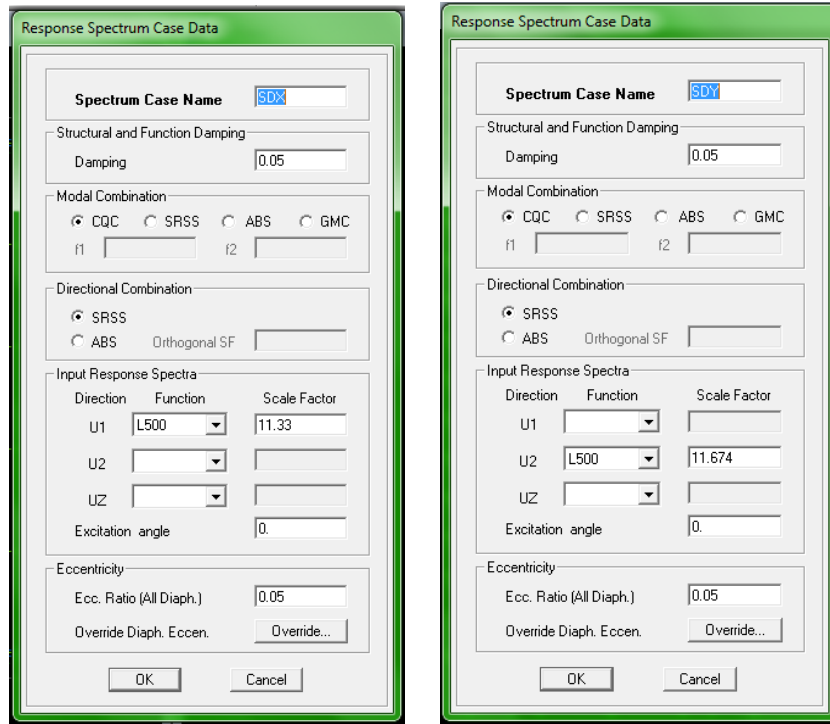
Se determinó una estructura regular, por lo tanto el valor del cortante dinámico total en la base, V_{ti} obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones de análisis, no puede ser menor que el 80 % de la estructura, del cortante sísmico en la base, V_s , calculado por el método de la fuerza horizontal equivalente.

Para efectos de no cumplir con lo establecido se debe multiplicar por el siguiente factor de modificación.

$$0.80 \frac{V_s}{V_{tj}}$$

De acuerdo con el factor de modificación arrojado, se realiza el ajuste en el caso espectral de carga.

Figura 17 Ajuste de datos



Fuente: Propia

Figura 18. Verificación del 80% del cortante basal Vs.

ANÁLISIS SISMICO - FHE				$\Omega_0 =$	2.5
Estructura	Regular	$T_a =$	1.00	$\phi_s =$	1.0
$C_T =$	0.049	W (KN) =	150736.55	$\phi_p =$	1.0
$\alpha =$	0.75	S_a ($2.5 \cdot A_a \cdot F_a \cdot I$) =	0.36	$\phi_r =$	1.0
$h =$	56.00	$V_s =$	53699.90	$R =$	5.0
AJUSTE DE LOS DATOS					
REACCION ESPECTRAL EN LA BASE				INDICE	FACTOR
CASOS	SDX =	42961.19	0.800	1.000	9.810
ESPECTRALES	SDY =	42959.10	0.800	1.000	9.810

Fuente: Propia

9.1.3 Derivas

Se realizó la verificación de la deriva para cada una de las estructuras incluyendo los efectos P-Delta, los cuales producen un aumento en las deflexiones horizontales y en las fuerzas internas de la estructura.

Se anexa las hojas de cálculo con la verificación de la deriva para cada una de las estructuras analizadas tanto para el método de la fuerza horizontal equivalente como para el método de análisis dinámico elástico.

9.1.4 Combinaciones de las diferentes solicitaciones

Se realizaron las diferentes solicitaciones para obtener las fuerzas internas de diseño de la estructura, de acuerdo con los requisitos del Capítulo B.2 del Reglamento de la NSR-10, por el método de diseño propio de cada material estructural.

Se anexan las hojas de cálculo con las combinaciones de las diferentes solicitaciones para cada una de las estructuras analizadas tanto para el método de la fuerza horizontal equivalente como para el método de análisis dinámico elástico.

9.2 COMPARACIÓN MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y MÉTODO ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO

Los siguientes son los principales resultados obtenidos, considerando aspectos tales como el índice de deriva máxima, la fuerza sísmica, los esfuerzos, la cantidad de concreto, la cantidad del refuerzo y la variación del costo total.

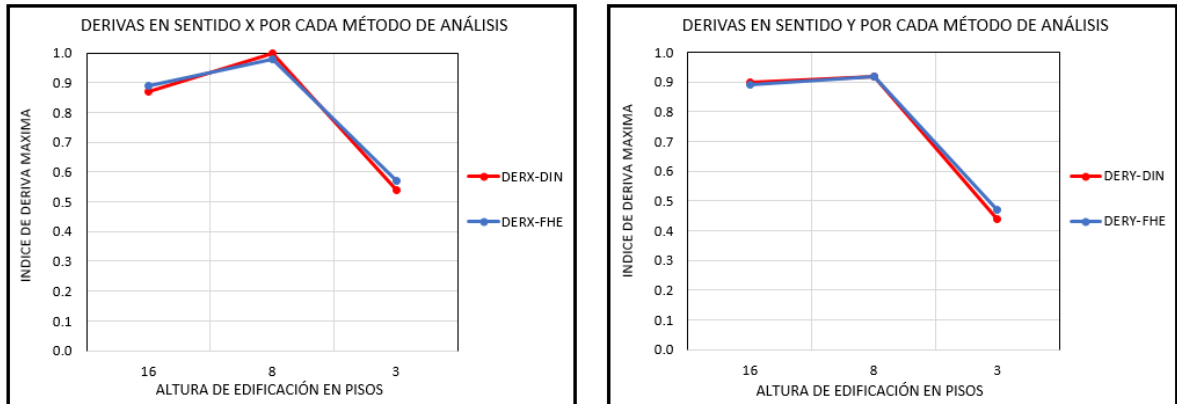
Para efectos de ilustrar apartes del estudio, las figuras y los valores obtenidos muestran la variación de cada uno de las edificaciones por el método de análisis dinámico elástico y por el método de la fuerza horizontal equivalente.

9.2.1 Índice de deriva máxima

El índice de deriva máxima obtenida para cada una de las edificaciones analizadas de 3, 8 y 16 pisos, se señalan en la Figura 17 para desplazamientos en el *sentido X*

y en el *sentido Y* respectivamente. Los valores de las derivas están en los límites permisibles descritos en la NSR-10 de 1.0%h. Se obtuvieron valores similares con cada uno de los métodos de análisis estudiados, con el fin de constituir un parámetro que permita comparar distintas variables en función de un mismo desplazamiento.

Figura 19. Índice de deriva máxima.



Fuente: Propia.

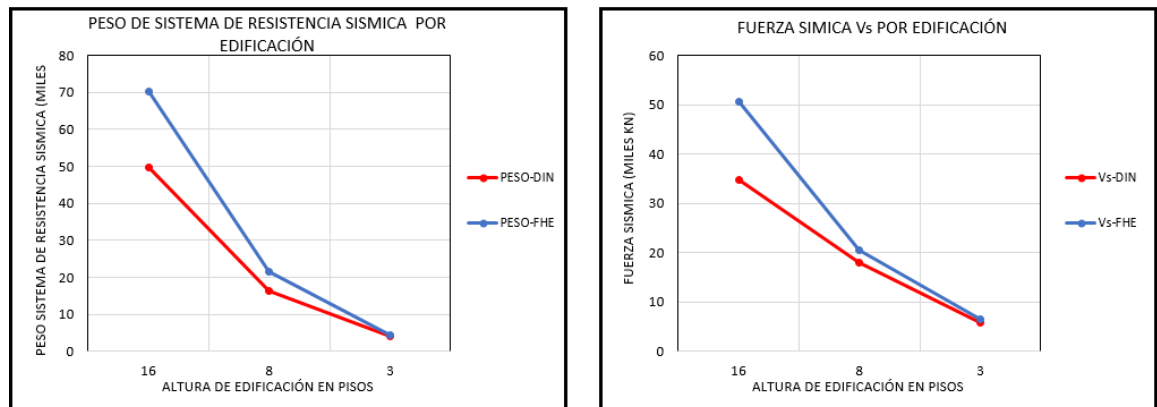
Se buscó en principio obtener índices de derivas cercanas al límite permisible del 1.0%h con el fin de proporcionar mayor flexibilidad y por tanto mayor capacidad de disipación de energía, esto se consiguió en las edificaciones de 16 y 8 pisos, sin embargo en las edificaciones de 3 pisos se obtuvieron índices de deriva por el orden del 0.5%h debido a que en la etapa de diseño fue necesario aumentar las dimensiones de secciones en columnas por cuanto estas no tenían la resistencia suficiente para soportar los esfuerzos a los que se encontraban sometidas, de manera que por solicitudes de diseño se requirió un dimensionamiento tal que rigidizo la estructura y redujo el índice de deriva.

9.2.2 Peso sistema de resistencia sísmica y fuerza sísmica

El peso del sistema de resistencia sísmica de los edificios analizados se muestra en la Figura 18. El peso de las edificaciones de 16 pisos varía entre 49.660KN y 70.117KN, para las de 8 pisos varía entre 16.332KN y 21.501KN, y por ultimo para

las de 3 pisos varía entre 4.138KN y 4.452KN. El peso aumenta debido al mayor dimensionamiento en algunos elementos estructurales por requisitos de rigidez y diseño.

Figura 20. Peso del sistema de resistencia sísmica y fuerza sísmica



Fuente: Propia.

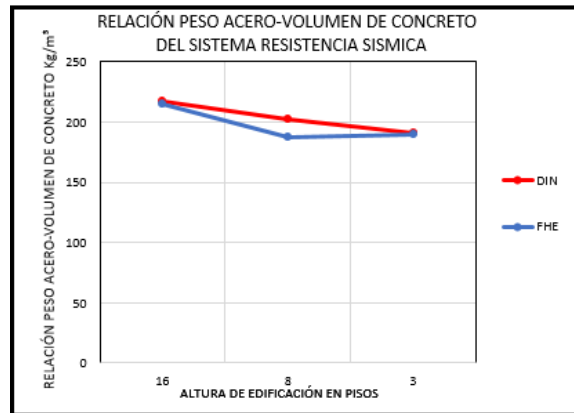
Así mismo la Figura 18 presenta la variación en el cortante en la base V_s debido a fuerzas sísmicas actuantes en las edificaciones analizadas. Para edificios de 16 pisos se encuentra entre 34.720KN y 50.687KN, para los de 8 pisos entre 17.983KN y 20.513KN y para el de 3 pisos entre 5.715KN y 6.405KN. La fuerza sísmica varía en función del peso de las edificaciones, a mayor masa mayor es la afectación del sismo.

Se observa que la variación del peso y la fuerza sísmica entre edificaciones de igual altura es mayor a medida que se incrementa el número de pisos.

9.2.3 Relación peso acero-volumen de concreto

La relación peso acero-volumen de concreto del sistema de resistencia sísmica de los edificios analizados se muestra en la Figura 21. En las edificaciones de 16 pisos varía entre 217 Kg/m³ y 215 Kg/m³, para las de 8 pisos varía entre 202 Kg/m³ y 187 Kg/m³, y por ultimo para las de 3 pisos varía entre 189 Kg/m³ y 191 Kg/m³.

Figura 21. Peso acero de refuerzo vs volumen de concreto.



Fuente: Propia.

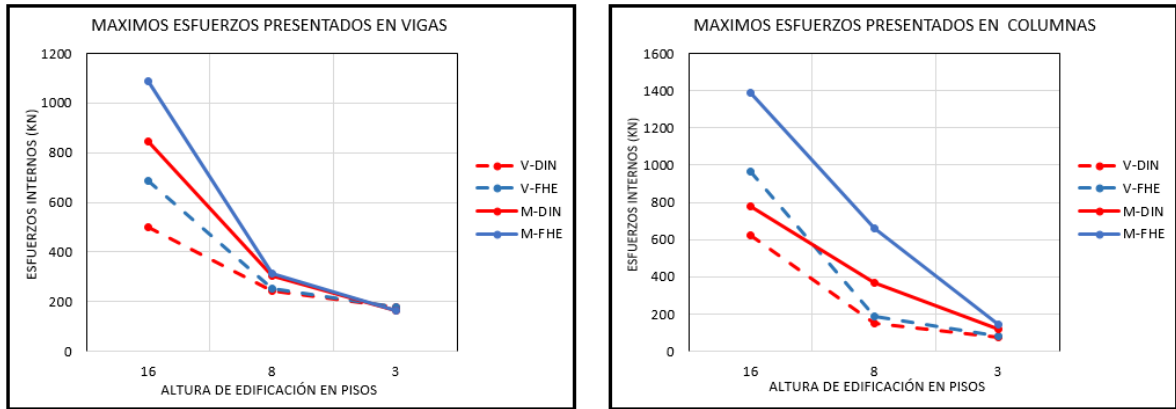
Esta relación no muestra mayores diferencias sin embargo, si vale la pena destacar que los diseños realizados por el método de análisis dinámico elástico presenta una mayor relación peso acero de refuerzo vs volumen de concreto del orden del 1% con respecto a los diseños realizados por el método de la fuerza horizontal equivalente.

9.2.4 Máximos esfuerzos en vigas y columnas

Los máximos esfuerzos internos calculados en los elementos que conforman el sistema de resistencia símica de los edificios analizados por cada uno de los métodos de análisis se muestran en la Figura 19. Los esfuerzos cortantes en vigas de las edificaciones varían entre 502KN y 687KN en las de 16 pisos, 245KN y 251KN, en las de 8 pisos y en las de 3 pisos se presentan esfuerzos cortantes de igual magnitud por los dos métodos analizados con un valor de 178KN. Los esfuerzos cortantes en columnas varían entre 844KN y 1.087KN en las edificaciones de 16 pisos, 304KN y 314KN, en las edificaciones de 8 pisos y en las edificaciones de 3 pisos se presentan esfuerzos cortantes de igual magnitud por los dos métodos analizados con un valor de 164KN. Los esfuerzos internos en los elementos están en función de las fuerzas sísmicas aplicadas a la edificación, en

tal sentido se evidencia variaciones más significativas en las edificaciones de 16 pisos.

Figura 22. Máximos esfuerzos presentados en vigas y columnas



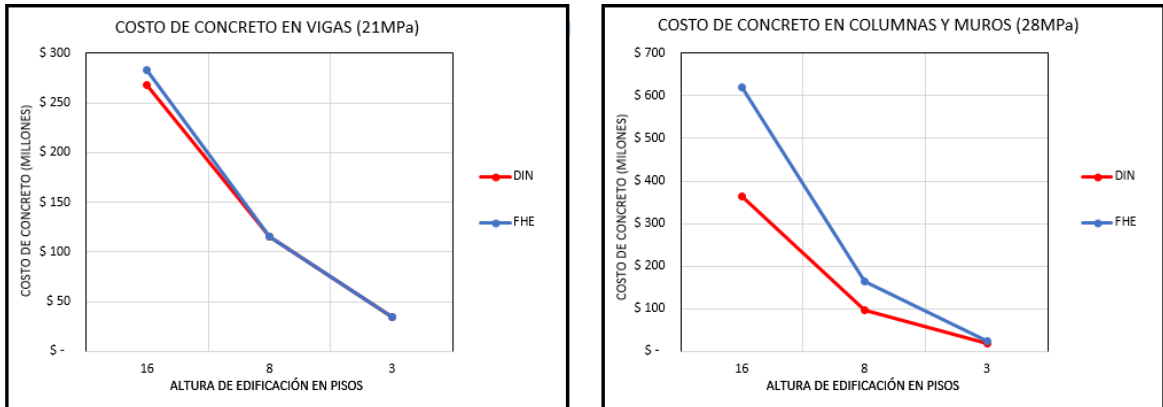
Fuente: Propia.

9.2.5 Costo de concreto

Los costos de concreto se determinaron a partir del volumen de concreto requerido para el sistema de resistencia sísmica para cada una de las edificaciones estudiadas, se tomó como referencia los precios de concreto de $f'c=21\text{MPa}$ a razón de $\$293.328.00/\text{m}^3$ para vigas y $f'c=28\text{MPa}$ a razón de $\$311.176.00/\text{m}^3$ para columnas y muros de la empresa Argos a fecha del 20 de enero de 2015.

Los costos obtenidos se muestran en la Figura 20, para vigas varían entre $\$268'303.602.00$ y $\$282'721.260.00$ en las edificaciones de 16 pisos, en las edificaciones de 8 y 3 pisos se obtienen costos similares de $\$114'890.711.00$ y $\$34'569.291.00$ respectivamente. Los costos en columnas varían entre $\$364'449.331.00$ y $\$619'682.592.00$ en las edificaciones de 16 pisos, $\$96'962.442.00$ y $\$165'296.691.00$ en las de 8 pisos y $\$18'609.881.00$ y $\$22'768.748.00$ en las edificaciones de 3 pisos.

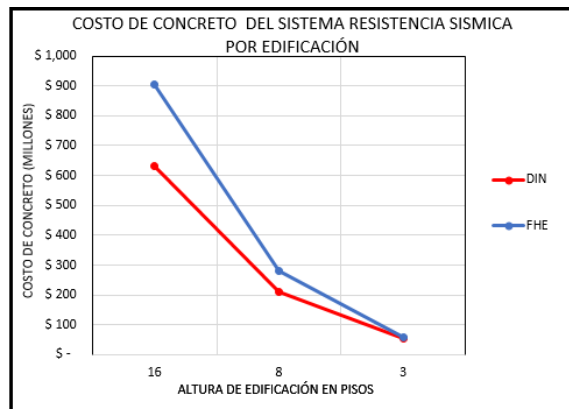
Figura 23. Costo de concreto en vigas, columnas y muros



Fuente: Propia.

Los costos totales de volumen de concreto se muestran en la Figura 21. Estos oscilan entre \$632'752.933.00 y \$902'583.852.00 en las edificaciones de 16 pisos, \$211'853.852.00 y \$280'187.402.00 en las edificaciones de 8 pisos \$53'179.172.00 y \$57'338.039.00 en las edificaciones de 3 pisos, mostrando variaciones importantes que van aumentando entre edificaciones de igual altura a medida que se incrementa el número de pisos, cabe anotar que estas variaciones se deben principalmente a las diferencias de costos presentadas en columnas y muros.

Figura 24. Costo total de concreto del sistema de resistencia sísmica



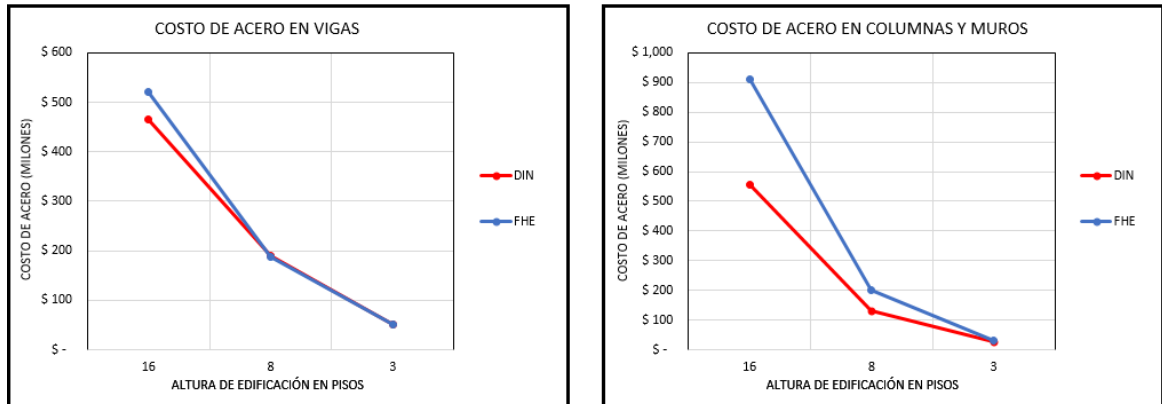
Fuente: Propia.

9.2.6 Costo de acero

Los costos de acero se determinaron a partir del peso requerido para el refuerzo de elementos del sistema de resistencia sísmica para cada una de las edificaciones estudiadas, se tomó como referencia los precios de acero de $f_y=420\text{MPa}$ a razón de $\$2.250.\text{oo}/\text{Kg}$ de la empresa Acerías PazdelRio a fecha del 20 de enero de 2015.

Los costos obtenidos se muestran en la Figura 22, para vigas varían entre $\$464'567.702.\text{oo}$ y $\$521'102.678.\text{oo}$ en las edificaciones de 16 pisos, en las edificaciones de 8 y 3 pisos se obtuvieron costos similares de $\$189'000.000.\text{oo}$ y $\$51'000.000.\text{oo}$ respectivamente. Los costos en columnas varían entre $\$559'149.811.\text{oo}$ y $\$911'286.568.\text{oo}$ en las edificaciones de 16 pisos, $\$130'879.499.\text{oo}$ y $\$199'659.696.\text{oo}$ en las de 8 pisos y $\$26'179.104.\text{oo}$ y $\$30'336.961.\text{oo}$ en las edificaciones de 3 pisos.

Figura 25. Costo de acero en vigas y columnas

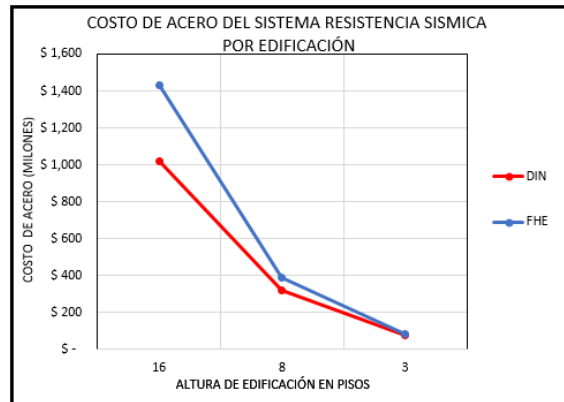


Fuente: Propia.

Los costos totales de acero se muestran en la Figura 23. Estos varían entre $\$632'752.933.\text{oo}$ y $\$902'583.852.\text{oo}$ en las edificaciones de 16 pisos, $\$211'853.852.\text{oo}$ y $\$280'187.402.\text{oo}$ en las edificaciones de 8 y $\$53'179.172.\text{oo}$ y $\$57'338.039.\text{oo}$ en las edificaciones de 3 pisos, mostrando variaciones importantes que van aumentando entre edificaciones de igual altura a medida que se incrementa

el número de pisos, cabe anotar que estas variaciones se deben principalmente a las diferencias de costos presentadas en columnas y muros.

Figura 26. Costo total de acero del sistema de resistencia sísmica

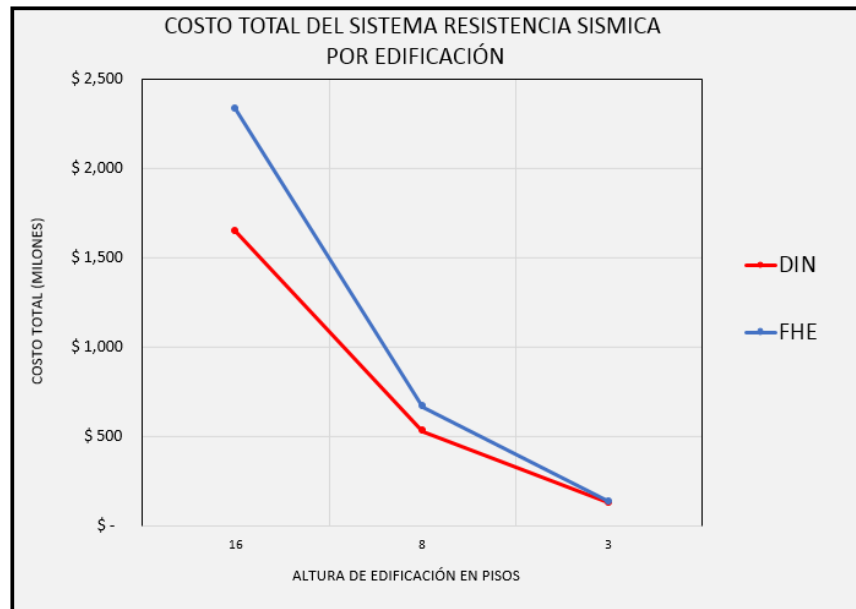


Fuente: Propia.

9.2.7 Costo total del sistema de resistencia sísmica

Los costos totales se determinaron a partir de la sumatoria de costos de concreto y acero del sistema de resistencia sísmica, los cuales se muestran en la Figura 24, Estos varían entre \$1.653'470.466.00 y \$2.334'973.098.00 en las edificaciones de 16 pisos, \$531'970.396.00 y \$668'600.978.00 en las edificaciones de 8 y \$129'611.621.00 y \$138'724.778.00 en las edificaciones de 3 pisos, mostrando variaciones importantes que van aumentando entre edificaciones de igual altura a medida que se incrementa el número de pisos, cabe anotar que estas variaciones se deben principalmente a las diferencias de costos presentadas en columnas y muros.

Figura 27. Costo total del sistema de resistencia sísmica



Fuente: Propia.

10. CONCLUSIONES

El método de la fuerza horizontal equivalente supone que las estructuras vibran según el primer modo de vibración, o modo fundamental, para estructuras regulares en planta y elevación tal como aquellas para las cuales está orientado este método, es normal considerar que los desplazamientos horizontales asociados al modo fundamental varían linealmente en función de la altura del piso, lo que supone una masa modal igual al 100% de la masa de la estructura. El análisis dinámico involucra el estudio detallado del comportamiento de las estructuras sometidas a excitaciones sísmicas e incluye modos de vibración más significativos en la descripción del comportamiento de la estructura, la masa modal es siempre positiva, y su valor es tal que la suma de la M_i de todos los modos es exactamente igual al 100 % de masa de toda la estructura. Sobre la base de este concepto es posible decidir si el número de modos considerados es suficiente, a partir que la suma de las masas modales de todos los modos incluidos en el análisis alcance un cierto porcentaje de la masa total. Sin embargo, se considera que es suficiente cuando la suma de la masa modal de los modos incluidos en el análisis alcanza o supera el 90% de la masa total de la estructura. De lo anterior parte la razón por la cual en el método de la fuerza horizontal equivalente se generan mayores fuerzas sobre el sistema en comparación con el análisis dinámico.

Se evidencia un aumento significativo en la fuerza sísmica entre edificaciones de igual altura a medida que se incrementa el número de pisos obtenida por el método de la fuerza horizontal equivalente con respecto a las obtenidas por el método del análisis dinámico elástico, esto se debe a que el análisis de la fuerza horizontal equivalente solicita por requisitos de rigidez y de diseño dimensiones en los elementos estructurales más grandes, por lo tanto se adquirió mayor masa y mayor afectación del sismo. La metodología del análisis dinámico elástico resulta ser más apropiado para edificaciones de grandes masas que el de la fuerza horizontal equivalente.

El uso del método de la fuerza horizontal equivalente para edificaciones regulares en zona de respuesta sísmica lacustre 500 significa un aumento de la cantidad de materiales y de los costos de la estructura si se le compara con los resultados obtenidos del análisis por el método dinámico elástico.

El uso del método de análisis dinámico elástico resulta favorable para el diseño de edificios regulares de 16 y 8 pisos debido a que se presentan menores fuerzas sísmicas, en consecuencia menores dimensiones y esfuerzos internos en los elementos que conforman el sistema de resistencia sísmica, significando menores costos de materiales. Por el contrario, para el diseño de edificaciones de 3 pisos el uso de la metodología de análisis esta consideración del diseñador, ya que no se evidenciaron variaciones significativas en los esfuerzos internos de los elementos de resistencia sísmica.

La comparación de los resultados de las variaciones económicas de las estructuras empleando el análisis por el método de fuerza horizontal equivalente y por el método de análisis dinámico elástico en edificaciones regulares de 16 pisos equivale a \$681'502.652.00, para edificaciones de 8 pisos \$136'630.582.00, para edificaciones de 3 pisos \$9'113.157.00, en zona de respuesta sísmica lacustre 500. Dichas variaciones principalmente a las diferencias de costos presentadas en columnas y muros, para efectos de las vigas y placas de entrepiso las variaciones son mínimas o nulas y no resultan representativas. Para la determinación de costos solo se consideró el valor del concreto por m³ y del acero por kg, requerido para la construcción de la edificación usando cada uno de los métodos objeto del estudio, no se tuvo en cuenta valor de mano de obra.

11. BIBLIOGRAFIA

BAZÁN, Enrique y MELI, Roberto. Diseño sísmico de edificios. México: Limusa S.A, 1998. 317p.

BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Introducción al análisis dinámico de estructuras. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. 9p. Cap. VIII.

BERMÚDEZ MEJÍA, Carlos Alberto. Método de la fuerza horizontal equivalente. EN: Análisis estructural avanzado. Universidad Nacional de Colombia. 9p.

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA, Del Gobierno. EN: Constitución Política De Colombia. 13ed. Bogotá: Temis S.A., 2011. p.107.

CORZO VÉLIZ, Kenny Rolando. Diseño de un modelo estructural con el programa Etabs. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería civil. 2005. p.15.

GARCIA REYES, Luis Enrique. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Bogotá: Universidad de los Andes, 1998. p.95.

GONZÁLEZ CATILLO, Clara Isabel. Comparación de los métodos: fuerza horizontal equivalente y análisis modal. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de ingeniería civil, 1992.

JARAMILLO, J.O., Análisis Clásico de Estructuras. 2004: Universidad Nacional de Colombia.

ORTEGA MENÉNDEZ, Joaquín. Análisis Comparativo entre Sismo Estático y Dinámico, para marcos de concreto reforzado. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería civil. 2011. 89p.

QUIROZ TORRES, Luis Gabriel. Análisis y diseño de edificaciones con ETABS. Perú: Macro E.I.R.L. 2011. 389p.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. Documentación. Requisitos generales de diseño sismo resistente. NSR-10 A.3.4.2.1 Bogotá: El Instituto, 2010.

SARRIA MOLINA, Alberto. Ingeniería sísmica. 2 ed. Santa Fe de Bogotá: Ediciones Uniandes, 1995. p.2.

SEGURA, Jorge. Estructuras de concreto. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011. p58.

TINJACA, Libardo. GARCIA, Luis Enrique y CARDONA, Omar. Aumento relativo de costos de estructuras de concreto reforzado debido a la aplicación de las NSR-98 y el uso de la microzonificación sísmica de Bogotá. EN: XIII jornadas estructurales de la ingeniería colombiana. Sociedad colombiana de ingenieros - Asociación Colombiana de ingenieros estructurales. Santafé de Bogotá D.C.1.999.p.249-273.

TORRES, Mario Camilo. Estructura de la línea primaria de investigación en estructuras. EN: Líneas De Investigación Facultad de Ingeniería Civil. Bogotá, Universidad la Gran Colombia, 2010.

VALLECILLA B., Carlos Ramiro. Fuerzas sísmicas principios y aplicaciones. Bogotá: Bauen. 2003. 328p.

ZONIFICACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE BOGOTÁ PARA EL DISEÑO
SISMO RESISTENTE DE EDIFICACIONES. Documentación. Informe final.
Volumen1 Bogotá: El Instituto, 2010. p.33.

12. ANEXO 1

12.1 ANALISIS DINAMICO ELASTICO

12.1.1 Memorias de cálculo edificación de 16 pisos

12.1.2 Planos estructurales edificación de 16 pisos

12.1.3 Memorias de cálculo edificación de 8 pisos

12.1.4 Planos estructurales edificación de 8 pisos

12.1.5 Memorias de cálculo edificación de 3 pisos

12.1.6 Planos estructurales edificación de 3 pisos

12.2 FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

12.2.1 Memorias de cálculo edificación de 16 pisos

12.2.2 Planos estructurales edificación de 16 pisos

12.2.3 Memorias de cálculo edificación de 8 pisos

12.2.4 Planos estructurales edificación de 8 pisos

12.2.5 Memorias de cálculo edificación de 3 pisos

12.2.6 Planos estructurales edificación de 3 pisos