

**Efecto de la interacción suelo-estructura sobre las cantidades de obra de un sistema
estructural combinado**

Manuel Alberto Sepúlveda Pinto

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Luis Eduardo Zapata Orduz

PhD. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco de referencia.....	14
2.1 Cantidades de obra.....	14
2.2 BIM.....	14
2.3 Sistema estructural combinado.....	15
2.4 Interacción suelo-estructura.....	15
2.5 Fenómenos relacionados con la interacción suelo-estructura.....	16
2.5.1 Interacción inercial.....	16
2.5.2 Interacción cinemática.....	17
2.6 Metodología de análisis de interacción suelo-estructura recomendada por NEHRP consultants Joint Venture.....	18
3. Metodología.....	22
3.1 Características de la estructura y los materiales.....	22
3.2 Solicitaciones de la estructura.....	23
3.3 Modelo matemático de la estructura.....	24

3.4 Análisis dinámico lineal suponiendo la base fija	25
3.5 Determinación de los parámetros del suelo para el análisis de interacción suelo-estructura ..	26
3.6 Análisis dinámico lineal de interacción suelo-estructura	29
3.7 Diseño de los elementos	29
3.8 Modelamiento BIM	31
4. Resultados	32
4.1 Características del suelo	32
4.2 Parámetros que determinan el diseño	32
4.3 Solicitaciones de diseño de los elementos estructurales.....	34
4.4 Comparación de cantidades de obra entre modelos	38
4.4.1 Columnas y muros estructurales.	38
4.4.2 Vigas.....	40
4.4.3 Cimentaciones.....	41
4.5 Cantidades totales.....	42
5. Conclusiones	43
Referencias Bibliográficas.....	45

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Modelo matemático de la estructura.....	25
<i>Figura 2.</i> Flujo de trabajo análisis sísmico de interacción suelo estructura.....	28
<i>Figura 3.</i> Periodos fundamentales	33
<i>Figura 4.</i> Cortante basal.....	34
<i>Figura 5.</i> Carga axial máxima de diseño col E1.....	35
<i>Figura 6.</i> Momento máximo de diseño en X muro 2.....	35
<i>Figura 7.</i> Momento máximo de diseño en X col D1	36
<i>Figura 8.</i> Cortante máximo de diseño en Y muro 1	37
<i>Figura 9.</i> Cortante máximo de diseño en Y col A4.....	38
<i>Figura 10.</i> Cantidad de concreto en columnas y muros.....	39
<i>Figura 11.</i> Cantidad de acero de refuerzo en columnas y muros	40
<i>Figura 12.</i> Cantidad de acero de refuerzo vigas.....	40
<i>Figura 13.</i> Cantidad de concreto en zapatas.....	41
<i>Figura 14.</i> Cantidad de acero de refuerzo en zapatas	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Profundidad necesaria para cálculo de velocidad efectiva del perfil</i>	21
Tabla 2. <i>Características de los materiales</i>	23
Tabla 3. <i>Análisis de carga muerta por unidad de área</i>	24
Tabla 4. <i>Resumen parámetros que caracterizan los efectos locales</i>	26
Tabla 5. <i>Combinaciones de diseño</i>	31
Tabla 6. <i>Comparación de cantidades totales</i>	42

Lista de Apéndices

Ver documentos adjuntos en el CD y pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A Funciones De Impedancia

Apéndice B Parámetros geotécnicos

Apéndice C Características geométricas de la estructura

Apéndice D Análisis sísmico

Apéndice E Descripción gráfica de columnas

Apéndice F Calculo de propiedades del sistema suelo estructura

Apéndice G Demandas máximas de diseño en elementos verticales

Resumen

Título: Efecto de la interacción suelo-estructura sobre las cantidades de obra de un sistema estructural combinado *

Autor: Manuel Alberto Sepúlveda Pinto **

Palabras Clave: Interacción suelo estructura, Amortiguamiento por radiación, Base fija, Base flexible, Cantidades de obra

Descripción

El análisis estructural de edificaciones en la práctica se basa en la suposición que la estructura de cimentación se encuentra empotrada en la base (base fija), lo que en la práctica implica una desconexión entre el comportamiento del suelo y la estructura para efectos de diseño. Como es bien sabido, la realidad es que el suelo interactúa con la estructura de cimentación, por lo tanto, la verdadera respuesta de la estructura está ligada a esta interacción. El presente estudio se enfoca en comparar las cantidades de acero de refuerzo y volumen de concreto del sistema de resistencia sísmica de una edificación con sistema estructural combinado ubicada en la ciudad de Bucaramanga, a partir de un análisis dinámico lineal teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura por medio de resortes elásticos lineales y coeficientes de amortiguamiento viscosos; y un análisis dinámico lineal suponiendo la base fija en el software de análisis estructural Midas Gen. La metodología utilizada en este estudio tiene en cuenta las recomendaciones del Programa Nacional para la Reducción del Riesgo Sísmico (NERHP por sus siglas en Inglés) en lo que respecta a la incorporación de los efectos de interacción inercial en el análisis. Los resultados evidencian una redistribución de las solicitaciones de la estructura inducida por la incorporación de la flexibilidad en la base respecto al modelo rígido, presentándose en algunos elementos estructurales aumento de sección y de acero de refuerzo, sin embargo, en otros elementos se presentó el efecto contrario; situación que generó una especie de compensación en las cantidades de obra (acero de refuerzo) en los elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz PhD. en Ingeniería Civil

Abstract

Title: Effects of soil-structure interaction on material quantities of a combined structural system *

Author: Manuel Alberto Sepúlveda Pinto**

Key Words: Soil-structure interaction, Radiation damping, Fixed-base, Flexible-base, Material quantities

Description

Structural analysis of building structures is based on the assumption of a fixed base foundation. In practice, this brings about a disconnection between soil and structure behavior for design purposes. It is well known that real structural systems react to the relationship between soil and foundation structure. Hence, this study focuses on comparing material quantities (reinforcement steel and concrete) of a combined structural system on isolated footings located at Bucaramanga. Two seismic analysis for design were performed using the structural software Midas Gen. First, a fixed base analysis, then a soil-structure interaction analysis by using lineal point springs and dashpots, representing soil-foundation flexibility and radiation damping. The methodology used in this study follows the recommendations of NERHP (National Hazard reduction program) regarding to incorporation of inertial interaction in the seismic analysis of building structures. Results evidence a redistribution of structure loads on vertical elements due to the addition of a flexible base in the analysis in contrast to the rigid model, presenting an augmentation in some structural elements of cross section and reinforcement steel. However, some other structural elements showed the opposite result, which produced a compensation effect in material quantities (reinforcement steel, only) in vertical elements resisting lateral loads.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz PhD. en Ingeniería Civil

Introducción

Un área importante de la ingeniería civil es el análisis y diseño estructural de edificaciones, en esta el ingeniero debe adoptar modelos adecuados, con base en una serie de suposiciones, con el fin de representar características de la estructura y los materiales (Nilson, 2001).

Una de las suposiciones más comunes en la práctica del análisis de edificaciones es asumir que la base es fija (Khosravikia et al., 2018), es decir, que el suelo es indeformable y que las condiciones de apoyo son de empotramiento perfecto. Sin embargo, la realidad es que el suelo es flexible y la respuesta dinámica de la estructura y el suelo se afectan entre sí (Bolisetti, 2015). Esta interrelación entre el suelo y la estructura se le conoce como interacción suelo-cimentación-estructura o interacción suelo-estructura. En este campo, investigaciones han mostrado que la respuesta dinámica de una estructura soportada sobre suelo flexible puede diferir significativamente de la respuesta de la misma estructura soportada sobre una base rígida (Lou et al., 2011). Por lo tanto, resulta razonable incluir esta interacción en el análisis estructural en busca de obtener resultados más cercanos al comportamiento real del sistema (Kim, 2014).

Además, las características mecánicas del terreno tenidas en cuenta en el modelamiento pueden alterar la respuesta de la estructura (Fatahi et al., 2020), y de ser así, podría verse reflejado en las cantidades de obra.

En el presente trabajo se comparan los efectos en el diseño estructural de dos opciones de modelamiento de las condiciones de apoyo de una estructura en la base: un modelo en el cual se supone la base fija, contra un modelo que incorpora la flexibilidad del suelo adyacente por medio

de resortes y amortiguadores viscosos, haciendo uso del software de diseño MIDAS GEN 2018. La comparación se realiza a un sistema estructural combinado, conformado por un pórtico de concreto resistente a momentos con muros estructurales. Esto con el fin de determinar la influencia del modelamiento de las condiciones de apoyo en la base, sobre las cantidades de obra del sistema de resistencia sísmica de una edificación ubicada en la zona metropolitana de Bucaramanga. En el presente estudio cuando se hace uso del término “cantidades de obra”, se hace referencia únicamente a cantidades de acero de refuerzo y volumen de concreto.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar la influencia del modelamiento de las condiciones de apoyo en la base de una estructura, sobre sus cantidades de obra, por medio de dos alternativas: analizando la interacción suelo-estructura y suponiendo empotramiento.

1.2 Objetivos Específicos

Establecer las características generales de la estructura y el suelo.

Analizar la respuesta de la estructura a partir de dos alternativas de modelamiento: un análisis dinámico lineal de interacción suelo-estructura y un análisis dinámico lineal suponiendo la base fija.

Obtener las cantidades de obra a partir del diseño estructural de las dos alternativas.

2. Marco de referencia

2.1 Cantidades de obra

El cálculo de cantidades de obra es el proceso de medir y contar los elementos estructurales de una edificación (Monteiro & Martins, 2013). Los propósitos del cálculo de cantidades incluye estimación de costos, gerencia de costos, adquisiciones y planeación del cronograma de obra (Liu et al., 2016). En la práctica, el método tradicional de cálculo de cantidades incluye la interpretación de planos de diseño, y la medición de cada elemento de la edificación individualmente, teniendo en cuenta sus propias reglas de medición (Khosakitchalert et al., 2019).

2.2 BIM

El modelado de la información de la construcción (BIM por sus siglas en inglés) está surgiendo como una nueva forma de gestionar el flujo de información entre todas las partes interesadas durante un proyecto de construcción (Motamedi & Hammad, 2009), la cual permite una representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación (National Building Information Modeling Standard, 2015) y como tal, sirve como un recurso de conocimiento compartido para la información acerca de una instalación, que constituye una base fiable para las decisiones durante su ciclo de vida desde el inicio en adelante. Por otro lado, BIM es un enfoque de modelamiento digital, que representa información semántica y geométrica de una instalación (National Institute of Building Sciences, 2007); por lo tanto, ha revolucionado el

proceso de cálculo de cantidades de obra. En la práctica, las cantidades de obra pueden ser medidas automáticamente desde modelos BIM extrayendo los datos geométricos y propiedades semánticas de cada elemento (Sacks, Eastman, Lee, & Teicholz, 2018), lo que permite un cálculo de cantidades más ágil y preciso.

2.3 Sistema estructural combinado

El reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), define un sistema estructural combinado como aquel en el cual:

“(a) Las cargas verticales son resistidas por un pórtico no resistente a momentos, esencialmente completo, y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con diagonales, o

(b) Las cargas verticales y horizontales son resistidas por un pórtico resistente a momentos, esencialmente completo, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales, y que no cumple los requisitos de un sistema dual”.

2.4 Interacción suelo-estructura

La respuesta de una estructura sometida a cargas dinámicas, más específicamente, a cargas provocadas por sismo está afectada por las interacciones entre tres sistemas relacionados: La estructura, su cimentación y el suelo adyacente (FEMA, 2009).

De esta manera, la estructura de la cimentación junto con las cargas que obran sobre ella y las reacciones que se provocan en el suelo se sujetará a una determinada configuración, igual a la que

el suelo adoptará debido a las reacciones que éste aporta a la estructura de cimentación para su equilibrio (Zeevaert, 1980).

Cuando la estructura se encuentra cimentada sobre roca o suelo duro, los movimientos inducidos por el sismo en el contacto suelo-estructura son similares a los que producen los movimientos sísmicos en ausencia de estructura. Por otro lado, cuando existe un suelo (blando), la cimentación no sigue las deformaciones del suelo, sino que la estructura induce una deformación en el suelo que la soporta y a su vez el suelo influenciado por la misma, produce movimientos sobre la estructura. A este fenómeno se le denomina interacción suelo-estructura. (Jurado, 2012).

La configuración de esfuerzos y deformaciones en la superficie de suelo en contacto con la cimentación dependerá de la rigidez de la estructura de la cimentación, de la deformabilidad del subsuelo y de la distribución de cargas que se apliquen sobre la estructura de la cimentación. La interacción entre la estructura de cimentación y el suelo consistirá en encontrar un sistema de reacciones que aplicadas simultáneamente a la estructura de cimentación y a la masa del suelo produzcan la misma configuración de desplazamientos diferenciales entre los dos elementos (Zeevaert, 1980).

2.5 Fenómenos relacionados con la interacción suelo-estructura

2.5.1 Interacción inercial. La interacción inercial se refiere a los desplazamientos y rotaciones a nivel de cimentación de una estructura que resulta en fuerzas impulsadas por la inercia, tales como cortante de base y momento. La respuesta a las fuerzas inerciales pueden ser una fuente importante de flexibilidad y disipación de energía en el sistema suelo-estructura (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012).

Estas fuerzas están directamente relacionadas con la modificación en la respuesta estructural causadas por la flexibilidad del suelo adyacente, lo cual trae consigo un incremento en el periodo natural de la estructura y un incremento en el amortiguamiento histerético del suelo, junto al producido por la radiación de ondas reflejadas hacia el exterior de la estructura (amortiguamiento por radiación) (Bolisetti, 2015).

La forma más común de tener en cuenta los efectos de interacción inercial en la práctica es a partir de funciones de impedancia y amortiguadores viscosos. Sin embargo, es posible incorporar estos efectos a través de medios computacionales que incorporan métodos de análisis como el método de los elementos finitos y el método de elementos de frontera (Lou et al., 2011).

2.5.2 Interacción cinemática. Se le llama interacción cinemática a la modificación de los movimientos de campo libre debido a la presencia de una fundación rígida en el suelo (Bolisetti, 2015).

Para la mayoría de las estructuras convencionales resulta conservador efectuar solo el análisis de interacción inercial. No obstante, para algunas estructuras como las muy rígidas, poco esbeltas y de grandes dimensiones en planta se requiere incluir el análisis de interacción cinemática, a fin de predecir la respuesta estructural con mayor precisión (Áviles, 1999).

En la práctica, los efectos de interacción cinemática pueden ser tenidos en cuenta por medio de funciones de transferencia que modifican la respuesta del movimiento de campo libre y permiten estimar un espectro del movimiento de entrada sobre la fundación (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012).

2.6 Metodología de análisis de interacción suelo-estructura recomendada por NEHRP consultants Joint Venture

El proyecto conjunto de consultores del Programa Nacional para la Reducción del Riesgo Sísmico de Estados Unidos (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012) desarrolló una serie de recomendaciones para la incorporación de la flexibilidad de la base y el amortiguamiento del sistema suelo-estructura, basado en los estudios de Pais & Kausel (1988); Gazetas (1991); Mylonakis, Nikolaou, & Gazetas (2006); Anoyatis & Mylonakis (2012); Stewart, Bielak, & Dobry, 2003; entre otros. A partir de estas recomendaciones, es posible calcular valores de rigidez lineal elástica del sistema suelo-estructura (K_{sur}) dependientes de la frecuencia, como resultado de suponer una propagación de onda unidimensional. Estos estudios incorporan modificadores dinámicos de rigidez (α) y factores de corrección por enterramiento de la cimentación (η), teniendo en cuenta la interacción inercial y el amortiguamiento por radiación del sistema. Las funciones de impedancia y las relaciones de amortiguamiento presentadas en el **Apéndice A**, tienen como parámetros de entrada la frecuencia adimensional de la estructura (a_0), el módulo de corte del suelo para deformaciones unitarias grandes (G), el módulo de Poisson (ν), la profundidad de desplante (D) y, la mitad del ancho y largo de la cimentación (B y L). La rigidez final (k) de la base para zapatas aisladas, teniendo en cuenta los efectos dinámicos y de enterramiento, de acuerdo con la metodología utilizada en NEHRP Consultants Joint Venture (2012), y el coeficiente de amortiguamiento (ζ) para cada grado de libertad deben ser calculados por medio de las ecuaciones Ec- 1 y Ec- 2, respectivamente. La frecuencia adimensional se calcula a partir de Ec- 3 y Ec- 4.

$$k = K_{sur} \cdot \alpha \cdot \eta \quad \text{Ec- 1}$$

donde

k : Rigidez final para el grado de libertad.

K_{sur} : Rigidez estática de cimentación en superficie.

α : Modificador dinámico de rigidez.

η : Factor de corrección por enterramiento.

$$\zeta = \frac{2 \cdot k \cdot \beta}{\omega} \quad \text{Ec- 2}$$

donde

β : Relación de amortiguamiento por radiación de la fundación.

ω : Frecuencia angular de la estructura.

k : Rigidez final para el grado de libertad.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{Ec- 3}$$

donde

T : Periodo de la estructura considerando la base fija.

$$a_0 = \frac{\omega \cdot B}{V_s} \quad \text{Ec- 4}$$

donde

V_s : Velocidad de onda de corte del suelo

El módulo de corte del suelo para deformaciones unitarias pequeñas (G_0) se obtiene de la Ec-

5.

$$G_0 = \sqrt{V_s \text{ prom}^2 \rho} \quad \text{Ec- 5}$$

donde

ρ_s : Densidad de la masa de suelo

Adicionalmente, es posible incorporar la heterogeneidad del estrato de suelo a partir del cálculo de la velocidad efectiva promedio del perfil ($V_{s\ prom}$), utilizando la Ec- 6 (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012) en una profundidad efectiva (Z_p).

$$V_{s\ prom} = \frac{Z_p}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta Z_i}{(V_{s,F}(z))_i} \right)} \quad \text{Ec- 6}$$

donde

Z_p : Profundidad necesaria para calcular la velocidad efectiva del perfil.

ΔZ_i : Espesor de la capa.

$(V_{s,F}(z))_i$: Velocidad de onda de corte corregida por sobrecarga para la profundidad z en el intervalo discreto i .

El intervalo necesario para calcular una velocidad efectiva del perfil se calcula de forma independiente para cada grado de libertad (NEHRP Consultants Joint Venture, 2012) como se presenta en la Tabla 1. Para los grados de libertad horizontales de la Ec- 7 (X y Y), los intervalos comienzan en la base de la fundación, mientras que para los grados de libertad vertical en Z (Ec- 7) y rotacionales (Ec- 8 y Ec- 9) a nivel del terreno. Los resortes lineales se colocaron en la parte inferior de los elementos verticales (columnas y muros estructurales) a nivel superior de zapata.

Tabla 1.

Profundidad necesaria para cálculo de velocidad efectiva del perfil

Grado de libertad	Z_p	Ecuación
Traslación (X, Y, Z)	\sqrt{BL} $\sqrt[4]{B^3L}$	Ec- 7
Rotación en X	$\sqrt[4]{BL^3}$	Ec- 8
Rotación en Y		Ec- 9

Nota: Los valores B y L corresponden a la mitad del ancho y largo de la cimentación, respectivamente para zapatas céntricas. Adaptado de NEHRP Consultants Joint Venture. (2012). Soil-Structure Interaction for Building Structures. <https://doi.org/12-917-21>.

Posteriormente, haciendo uso de la Ec- 10 (Adaptada de NEHRP Consultants Joint Venture, 2012), se corrigen los valores de velocidad de onda de corte en la profundidad debido al efecto de la sobrecarga:

$$V_{s,F}(z) \approx V_s(z) \left(\frac{\sigma'_v(z) + \Delta\sigma'_v(z)}{\sigma'_v(z)} \right)^{n/2} \quad \text{Ec- 10}$$

donde

n : exponente relacionado con el amortiguamiento de la fundación.

$V_{s,F}(z)$: Es la velocidad de onda de corte corregida por sobrecarga para la profundidad z .

$V_s(z)$: Velocidad de onda de cortante en campo libre a la profundidad z .

$\Delta\sigma'_v(z)$: Incremento del esfuerzo vertical debido al peso de la estructura en la profundidad z .

3. Metodología

El presente estudio se enfoca en determinar la influencia del modelamiento de las condiciones de apoyo en la base de la estructura, sobre las cantidades de obra de los elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica de una edificación con sistema estructural combinado, conformado por un pórtico resistente a momentos (sistema de resistencia de cargas verticales) combinado con muros estructurales (sistema de resistencia de cargas horizontales), localizado en la ciudad de Bucaramanga, Santander y cimentado sobre un perfil de suelo tipo D, clasificado a partir de los parámetros representativos para la zona metropolitana de Bucaramanga mostrados en el **Apéndice B**. A continuación, se exponen las diferentes características tenidas en cuenta y los procedimientos realizados para el desarrollo del presente trabajo.

3.1 Características de la estructura y los materiales

La edificación de estudio consta un sistema estructural de 6 niveles conformado por un pórtico de concreto reforzado de 3 vanos en cada dirección, combinado con muros estructurales y un sistema de entrepiso que consta de una losa nervada en la dirección X del edificio. El **Apéndice C** contiene una representación gráfica de los ejes de la estructura, la configuración de los elementos estructurales (vigas, columnas y muros) que hacen parte del sistema de resistencia sísmica de la edificación y detalles del sistema de entrepiso. La estructura se encuentra cimentada sobre zapatas aisladas céntricas a 1m de profundidad de desplante, conectadas por vigas de amarre. La altura de

entrepiso es de 2.75 m y los materiales establecidos en la fase de diseño, se presentan en la tabla 2. El módulo de elasticidad del concreto fue calculado a partir de la Ec-10, siguiendo los requisitos de la NSR-10.

Tabla 2.

Características de los materiales

Concreto	
f'_c [MPa]	28
Peso específico [kN/m ³]	24
Módulo de elasticidad [MPa]	24870
Acero de refuerzo	
f_y [MPa]	420
Peso específico [kN/m ³]	77

$$E = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec- 11}$$

3.2 Solicitaciones de la estructura

A partir de las características del edificio, grupo de uso y zona de amenaza sísmica se determinaron las cargas que debe soportar la estructura de acuerdo con la NSR-10. Para los pasillos se incluyó carga muerta de 6.7 kN/m² y carga viva de 1.8 kN/m², mientras que para los balcones se aplicó carga muerta de 6.7 kN/m² y carga viva de 5.0 kN/m². Un resumen de las consideraciones tomadas en cuenta para el análisis de carga muerta de la estructura se presenta en la **Tabla 3**. El peso propio de las viguetas (0.84 kN/m), que hace parte de la carga muerta, se incluyó en el modelo de forma separada. Adicionalmente, se añadió carga muerta de 15.7 kN/m y carga viva de 13.0 kN/m sobre las vigas del eje 2, entre ejes B y C (**Apéndice C**), provenientes de las reacciones de la escalera.

Tabla 3.

Análisis de carga muerta por unidad de área

Torta superior e inferior [kN/m²]	1,20
Casetón [kN/m ²]	0,06
Afinado de piso [kN/m ²]	1,60
Fachada y particiones [kN/m ²]	3,00
Total calculado [kN/m ²]	5,86
Total colocado (+15% calculado) [kN/m ²]	6,73

3.3 Modelo matemático de la estructura

El análisis de la estructura se realizó por medio de un modelo matemático en el software MIDAS GEN 2018 (figura 1), en el cual se incorporaron las propiedades de los materiales (**Tabla 2**), las características geométricas de la estructura (**Apéndice A**) y las solicitaciones de la estructura (Sección 0). Las vigas y columnas fueron modeladas como elementos tipo frame, mientras que los muros estructurales se incluyeron en el modelo matemático como elementos tipo membrana (con rigidez dentro y fuera del plano) con el fin de tener en cuenta su rigidez fuera del plano. Las cargas distribuidas sobre área se incluyeron en el modelo como cargas puntuales verticales sobre vigas que soportan viguetas y vigas riostras; mientras que, en las vigas perpendiculares se aplicaron como cargas lineales iguales al peso de su área aferente.

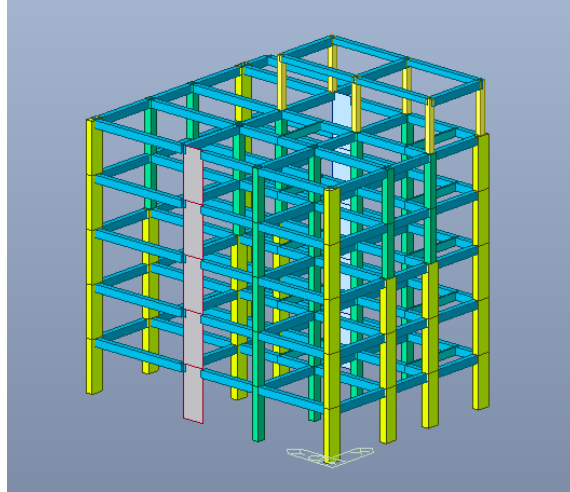


Figura 1. Modelo matemático de la estructura

3.4 Análisis dinámico lineal suponiendo la base fija

El primer análisis sísmico de la edificación, fue realizado a partir de un modelo dinámico lineal (modal espectral) suponiendo la base fija, basado en el modelo matemático descrito en la sección 3.3. Con base en la información mostrada en la Tabla 4 se calculó el espectro de aceleraciones de la estructura de acuerdo con el Capítulo A.2 de la NSR-10 y se incorporó dentro del modelo. En el análisis se utilizaron 8 modos de vibración de la estructura (para un porcentaje de participación de masa del 90%) combinados por el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados. Los resultados obtenidos se debieron ajustar conforme a lo estipulado en el artículo A.5.4.5 de la NSR-10; después se verificaron los límites de deriva. En el **Apéndice D** se detallan los requerimientos básicos del análisis sísmico realizado y un resumen de los parámetros obtenidos. Luego, se verificaron las derivas máximas en el centro de masa del diafragma, las cuales en concordancia con la NSR-10 no pueden exceder el 1% de la altura de entrepiso. En el **Apéndice E** se describen gráficamente las secciones de columnas obtenidas a partir de este análisis. Las secciones transversales de muros estructurales en los dos análisis se mantuvieron constantes en los dos

análisis (1.7 m x 0.3 m). Se modeló el comportamiento del diafragma como rígido. No se tuvo en cuenta secciones agrietadas en el análisis.

Tabla 4.

Resumen parámetros que caracterizan los efectos locales

Descripción	
Sistema estructural	Combinado
Ciudad	Bucaramanga
Zona de amenaza sísmica	Alta
Tipo de perfil de suelo	D
A_a	0.25
A_v	0.25
F_a	1.30
F_v	1.90
Coefficiente de importancia	1

Nota. basado en Reglamento Colombiano de construcción sismoresistente, {Asociación de ingeniería sísmica}, (2010)

3.5 Determinación de los parámetros del suelo para el análisis de interacción suelo-estructura

Para integrar las condiciones del suelo de cimentación en un modelo estructural y análisis sísmico fue necesario el uso de diferentes parámetros que caracterizan la flexibilidad y el amortiguamiento del sistema suelo-estructura. Las características mecánicas del perfil de suelo tomadas en cuenta en este trabajo, se basan en los parámetros comúnmente hallados en un estudio de suelos, es decir, número de golpes resultantes del ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), valores de cohesión (c') y ángulo de fricción (ϕ'), determinados mediante la ejecución de ensayos

de corte directo para muestras superficiales o correlaciones (Se utilizaron parámetros del suelo hipotéticos para el desarrollo del presente trabajo). Adicionalmente se calcularon los valores de velocidad de la onda de corte (V_s) de cada uno de los estratos de suelo, a partir de un promedio de la correlación obtenida por Uchiyama, Tonouchi, & Imai (1984) y la interpolación entre el número de golpes de SPT y los valores límites de velocidad de onda de corte de la tabla A.2.4-1 de la NSR-10. Los parámetros geotécnicos utilizados para caracterizar el comportamiento mecánico del suelo en el presente estudio se encuentran consignados en el **Apéndice B**. El tipo de perfil de suelo utilizado en el presente estudio se clasifica como tipo D de acuerdo con el Capítulo A.2.4.4 de la NSR-10. Para obtener el módulo de corte reducido para deformaciones unitarias grandes, se consideró una relación G/G_0 de 0.455 de acuerdo con la tabla A-2.1-1 de la NSR-10.

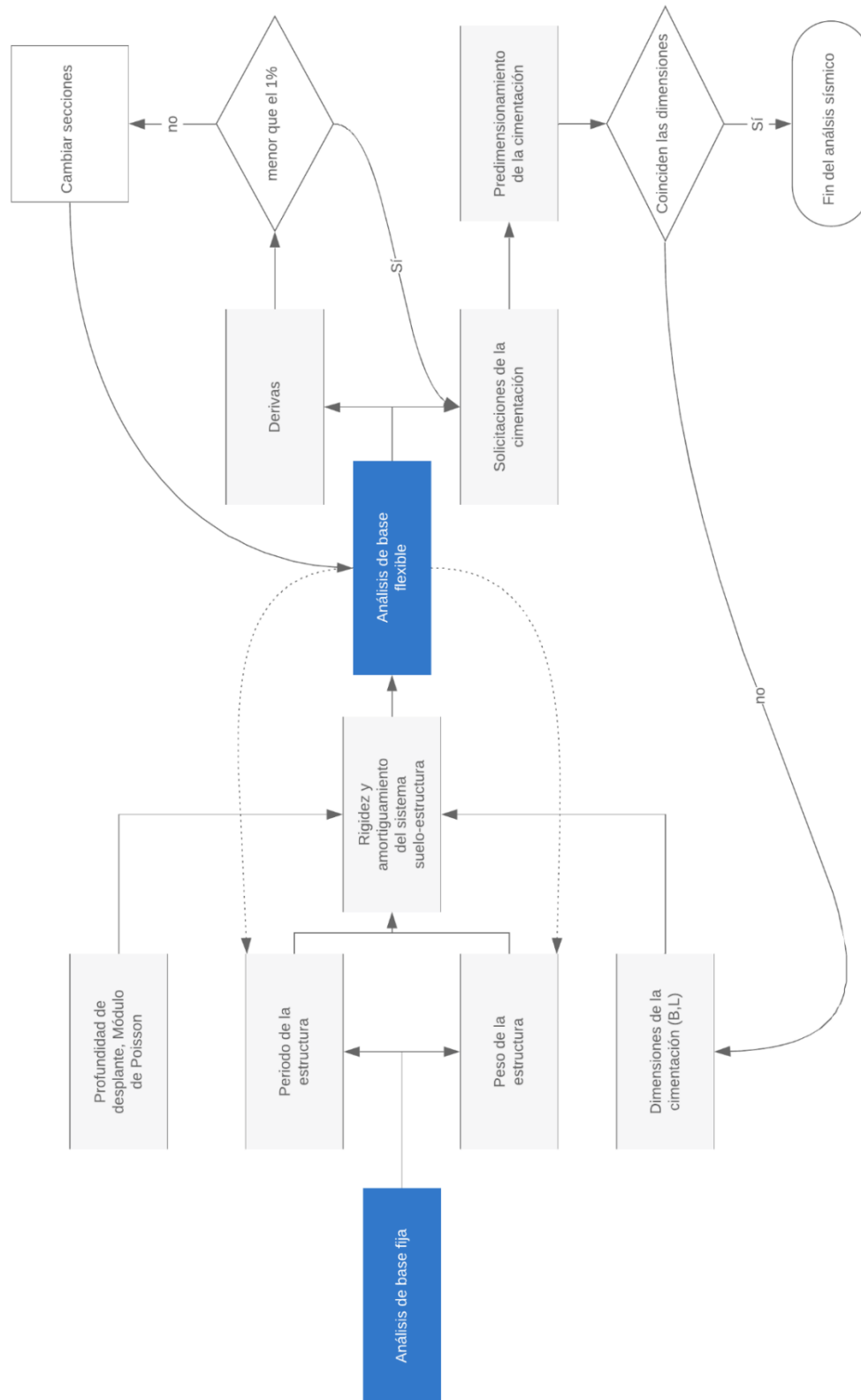


Figura 2. Flujo de trabajo análisis sísmico de interacción suelo estructura

3.6 Análisis dinámico lineal de interacción suelo-estructura

El segundo análisis sísmico realizado para el edificio incluyó los efectos de flexibilidad y amortiguamiento de la estructura a través del procedimiento de interacción suelo-estructura usado en la metodología recomendada en NEHRP Consultants Joint Venture (2012). Se realizó un análisis sísmico de acuerdo con las características, solicitaciones y procedimientos descritos en las secciones 3.1, y 3.3, agregando esta vez resortes puntuales (para cada grado de libertad) y coeficientes de amortiguamiento viscoso en la base de los elementos estructurales verticales; con el fin de simular la rigidez y el amortiguamiento por radiación del sistema. Se modeló el comportamiento del diafragma como rígido y no se tuvo en cuenta secciones agrietadas en el análisis. Se utilizaron 8 modos de vibración de la estructura (para un porcentaje acumulado de participación de masa del 90%), combinados por método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados. El procedimiento iterativo utilizado para el análisis sísmico incluyendo la interacción suelo-estructura, se presenta en la figura 2. En el análisis sísmico se iteraron únicamente secciones de columnas (en la dirección X) y zapatas. Un resumen de los parámetros obtenidos en este análisis es presentado en el **Apéndice D**. Las secciones de columnas producto del análisis sísmico de interacción suelo-estructura (base flexible) se presentan gráficamente en el **Apéndice E**.

3.7 Diseño de los elementos

En esta fase, se identificaron las irregularidades de la estructura y se determinó el coeficiente de capacidad de disipación de energía de la estructura (R), a partir de la Ec- 12 de acuerdo con lo estipulado en la NSR-10 en los Artículos A.3.7 y A.3.3.3, respectivamente.

$$R = \phi_p \phi_a \phi_r R_0 \quad \text{Ec- 12}$$

donde

R_0 : Coeficiente de disipación de energía básico (Tabla A.3.2 NSR-10).

ϕ_p : Factor de reducción de resistencia por irregularidad en planta a partir de la Tabla A.3-6 NSR-10.

ϕ_a : Factor de reducción de resistencia por irregularidad en altura a partir de la Tabla A.3-7 de la NSR-10.

ϕ_r : Factor de reducción de resistencia por ausencia de redundancia según A.3.3.8.

Las estructuras analizadas en el presente estudio, presentaron irregularidades del tipo 3A y 2P, así como ausencia de redundancia en el sistema de resistencia sísmica. El coeficiente de disipación de energía básico R_0 se determinó igual 7 de acuerdo con el Capítulo A.3.7 de la NSR-10. Por lo tanto, el coeficiente de disipación de energía (R) dio como resultado 4.25.

Posteriormente se redujeron las fuerzas sísmicas por el valor de R y se incluyeron las combinaciones de carga del Capítulo B.2.4.2 de la NSR-10. Los elementos fueron diseñados con capacidad especial de disipación energía (DES), ya que la edificación se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta según el capítulo A.2.3 de la NSR-10. Las combinaciones de resistencia utilizadas en el diseño de los elementos estructurales que hacen parte del sistema de resistencia sísmica son descritas en la tabla 5 Adicionalmente, se verificó que las secciones de vigas utilizadas en los análisis sísmicos (Vigas 30x40) fueran adecuadas para resistir sus solicitudes de diseño.

Tabla 5.

Combinaciones de diseño

Combinación	Descripción
Comb. 1	1.4D
Comb. 2	1.2D + 1.6L
Comb. 3	1.2D + 1.0Ex + 0.3Ey + 1.0L
Comb. 4	1.2D + 1.0Ex - 0.3Ey + 1.0L
Comb. 5	1.2D + 1.0Ey + 0.3Ex + 1.0L
Comb. 6	1.2D + 1.0Ey - 0.3Ex + 1.0L
Comb. 7	1.2D - 1.0Ex + 0.3Ey + 1.0L
Comb. 8	1.2D - 1.0Ex - 0.3Ey + 1.0L
Comb. 9	1.2D - 1.0Ey + 0.3Ex + 1.0L
Comb. 10	1.2D - 1.0Ey - 0.3Ex + 1.0L
Comb. 11	0.9D + 1.0Ex + 0.3Ey
Comb. 12	0.9D + 1.0Ex - 0.3Ey
Comb. 13	0.9D + 1.0Ey + 0.3Ex
Comb. 14	0.9D + Ey - 0.3Ex
Comb. 15	0.9D - Ex + 0.3y
Comb. 16	0.9D - Ex - 0.3Ey
Comb. 17	0.9D - Ey + 0.3Ex
Comb. 18	0.9D - 1.0Ey - 0.3Ex

3.8 Modelamiento BIM

Con los resultados del diseño de los elementos estructurales, se procedió a realizar un modelo BIM en el software Revit 2019 (licencia educativa), mediante el cual se representaron de manera detallada las características del diseño estructural de los elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica de la edificación para las dos alternativas estudiadas. Los modelos realizados incluyeron traslapes clase B para el acero longitudinal y confinamiento de los mismos acordes a

la NSR-10. Posteriormente, se calcularon las cantidades de obra dentro del programa y se analizaron los resultados.

4. Resultados

4.1 Características del suelo

En esta sección se disponen los resultados del cálculo de las características geotécnicas que se tuvieron en cuenta en el desarrollo del proyecto. En el **Apéndice F**, se expresan los resultados de cálculo de los parámetros utilizados para tener en cuenta la variación de la velocidad de onda de corte en profundidad del suelo, la corrección por sobrecarga, las funciones de impedancia y amortiguamiento del sistema suelo-estructura utilizando la metodología descrita en NEHRP Consultants Joint Venture (2012).

4.2 Parámetros que determinan el diseño

En esta sección se comparan los periodos fundamentales y el cortante sísmico de base para los dos modelos realizados, ya que son parámetros que influyen en forma directa en los resultados de diseño de una estructura y, por lo tanto, en las cantidades de obra.

En la figura 3 se contrastan los periodos fundamentales para cada dirección luego del análisis sísmico, allí se muestra un aumento del 4% y 3% de los periodos en dirección X y en dirección Y,

respectivamente, en el modelo de base flexible respecto al modelo de base fija. Adicionalmente, el periodo de control en la figura 3, que corresponde al periodo de la estructura resultante en el modelo de base flexible, analizada suponiendo empotramiento en la base; sirvió como base para visualizar la influencia de la interacción suelo estructura sobre los periodos fundamentales en el modelo de base flexible, mostrando un aumento del 5% en la dirección X y del 3% en la dirección Y. Lo que corrobora uno de los efectos esperados de la interacción inercial, sin embargo, su incidencia es leve en la edificación de estudio en las dos direcciones principales.

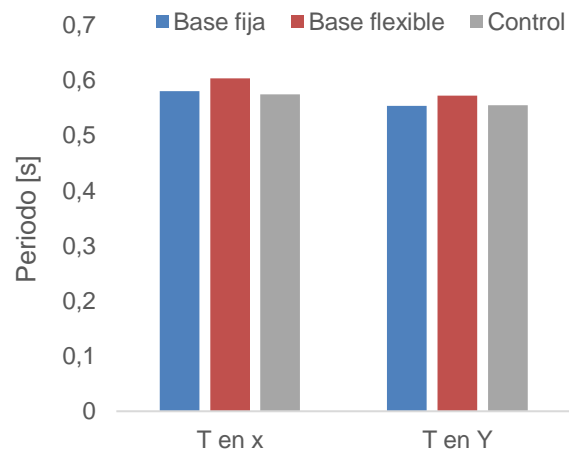


Figura 3. Periodos fundamentales

Por otro lado, la figura 4 muestra una diferencia del 1% en el cortante de base para los dos modelos realizados, lo cual no representa una variación importante en el cortante de base de diseño. Ya que, como se evidencia en el **Apéndice D**, la edificación en los dos análisis se encontró en la zona de periodos cortos del espectro de aceleraciones a pesar que fue necesario limitarlo de acuerdo con el Artículo A.4.2 de la NSR-10, el cortante basal se mantuvo dependiente solamente de la masa de la estructura, la cual mostró una disminución del 0.2% en el modelo de base flexible (**Apéndice D**).

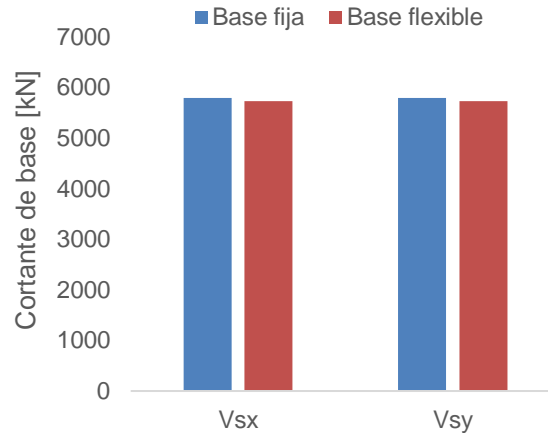


Figura 4. Cortante basal

4.3 Solicitaciones de diseño de los elementos estructurales

En esta sección se contrastan los resultados más representativos del análisis estructural de la edificación para los elementos verticales (columnas y muros), los cuales expresan los valores máximos obtenidos de las combinaciones de diseño presentadas en la **Tabla 5**. Los ejes de los elementos nombrados se encuentran representados en el **Apéndice C** y las solicitaciones máximas para cada uno de los elementos se encuentran en su totalidad en el **Apéndice G**. Las direcciones indicadas en las gráficas comparativas de las solicitaciones y cantidades de obra, hacen referencia a los ejes globales del modelo estructural.

La figura 5 muestra la carga axial máxima de diseño de la columna E1, la cual evidencia una disminución promedio del 4% en el modelo de base flexible para todos los pisos, comparado con el modelo de base fija. Esta misma comparación arrojó una disminución promedio del 2% para las columnas y un aumento promedio del 6% en la carga axial para los muros. Lo anterior indica una incidencia moderada de las consideraciones de interacción suelo-estructura en la carga axial de los elementos.

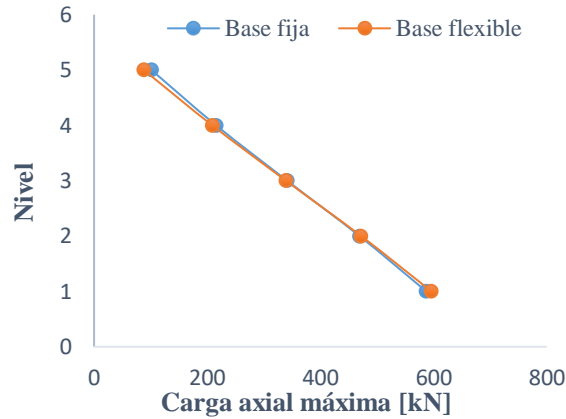


Figura 5. Carga axial máxima de diseño col E1

En la figura 6 se evidencia una reducción del 15%, 11% y 15% en el momento máximo de diseño en la dirección X para los niveles 1, 3 y 5 del muro 2 en el modelo de base flexible, en contraste con los resultados obtenidos del modelo de base fija. En promedio, esta reducción es del 15% en la base y del 6% para ambos muros e incluyendo todos los pisos. Estos resultados para el caso específico de los muros son congruentes con los obtenidos del estudio de Choinière et al. (2019) para un sistema estructural conformado por columnas y muros estructurales.

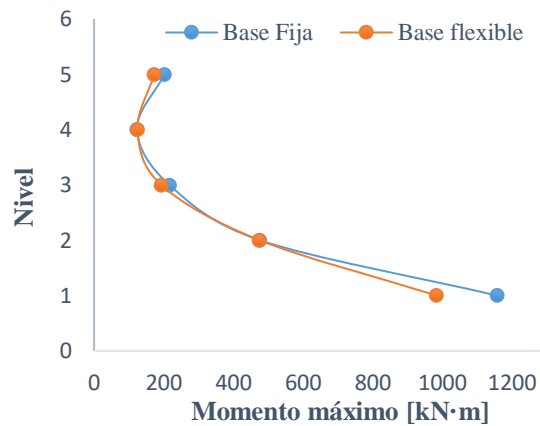


Figura 6. Momento máximo de diseño en X muro 2

La figura 7 por su parte, muestra un incremento en la demanda de momento en la dirección X para la columna D1 del 17% para el modelo de base flexible comparado con el mismo elemento en el modelo de base fija. Es importante resaltar que esta tendencia se repite en las solicitaciones de momento en dirección X para las demás columnas, lo cual se ve reflejado en un aumento promedio del 15% del momento en la dirección X de las columnas en la base. Lo anterior representa un efecto inesperado de la interacción suelo-estructura sobre los momentos máximos de diseño en la base de columnas si se toma como referencia los resultados del estudio realizado por Choinière et al. (2019), en el cual se presenta un aumento de las solicitaciones en la base de una estructura enterrada, conformada por muros y pórticos, únicamente cuando se tiene en cuenta una excesiva fisuración de los elementos. Sin embargo, en el presente estudio no se tuvo en cuenta la fisuración de los elementos y la estructura se encuentra cimentada sobre zapatas aisladas a poca profundidad. Como se muestra en el **Apéndice D**, en el modelo de base flexible se presentó una disminución generalizada de la rigidez relativa de los muros estructurales respecto a las columnas, lo cual se ve reflejado en las solicitaciones máximas de diseño mostradas en esta sección.

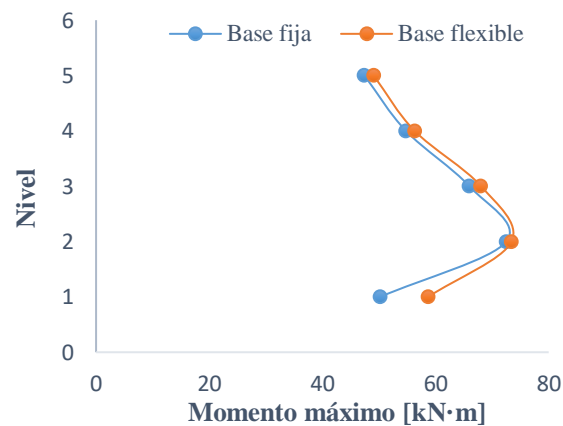


Figura 7. Momento máximo de diseño en X col D1

En el caso del cortante en la dirección Y, como se detalla en la figura 8, se evidenció un comportamiento regular para el muro 1, sin embargo, en los niveles 1 y 3 se presentaron reducciones del 15% y 13%, respectivamente en el modelo de base flexible. Estos mismos valores en promedio para muros mostraron una reducción del 15% y 12%, respectivamente en el modelo de base flexible.

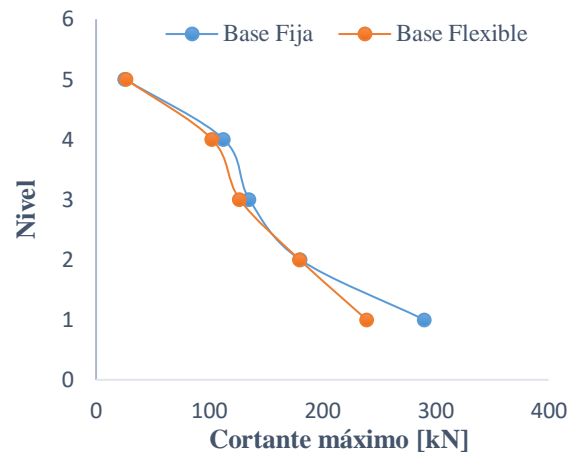


Figura 8. Cortante máximo de diseño en Y muro 1

En la figura 9, el cortante máximo de diseño en la dirección Y para la columna A4 expresada en la base y en el nivel 5, un aumento del 24% y una disminución del 19%, respectivamente en el modelo de base flexible comparado con el análisis de base fija. En general, las columnas mostraron un comportamiento irregular de las variaciones entre modelos, sin embargo, es posible afirmar que en promedio mostraron un aumento del aproximadamente un 4% en el cortante en la dirección Y en el modelo de base flexible. Es importante indicar que este comportamiento no se vio afectado por variaciones de dirección de los ejes fuertes en columnas, sus efectos se deben únicamente a cambio de las dimensiones en la dirección X de la estructura y a la incorporación de los efectos de

flexibilidad en la base y amortiguamiento por radiación en el modelo de interacción suelo-estructura.

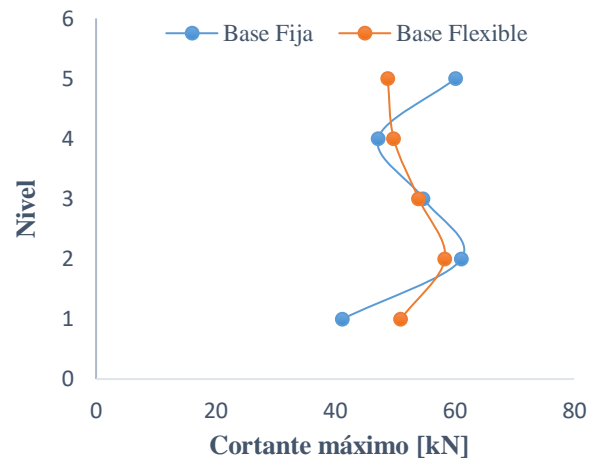


Figura 9. Cortante máximo de diseño en Y col A4

4.4 Comparación de cantidades de obra entre modelos

En esta sección se comparan las cantidades de obra en términos de volumen de concreto y acero de refuerzo (longitudinal y transversal) de los elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica de la estructura de estudio.

4.4.1 Columnas y muros estructurales. Las figuras 10 y 11 comparan las cantidades resultantes del diseño de los elementos estructurales para las dos alternativas de modelamiento. La figura 10 muestra una oscilación de la variación del volumen de concreto de los elementos estructurales entre los modelos.

En general se presentó variación en el volumen de concreto para las columnas y muros estructurales del 0.7%, las cuales obedecen principalmente a una redistribución en las demandas de rigidez de los elementos de acuerdo a su localización en planta.

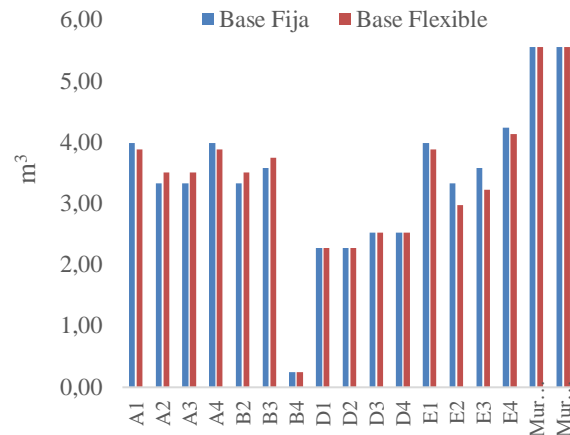


Figura 10. Cantidad de concreto en columnas y muros

En la **Figura 11** se presentan las cantidades de acero de refuerzo de columnas y muros. Se puede observar que existe una variación considerable entre el acero de los muros que se diseñaron a partir de un modelo de base flexible, la cual representa reducción del 27% con respecto al modelo de base fija. En el caso de las columnas, se observa que aquellas diseñadas a partir de un análisis de base flexible necesitaron en general un 16% más de acero de refuerzo, en este caso, la redistribución de las solicitaciones por sismo en la estructura, así como los requerimientos de acero mínimo dio como resultado un aumento en la cantidad de acero de refuerzo colocado.

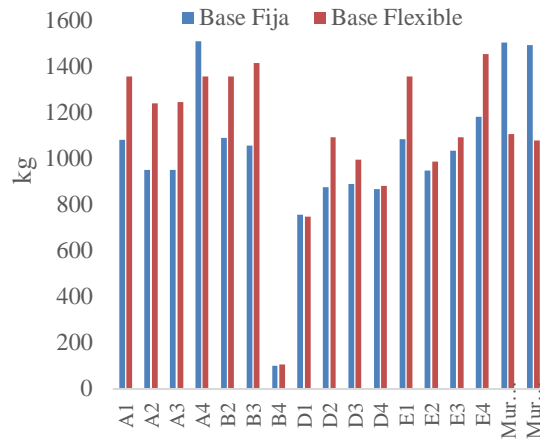


Figura 11. Cantidad de acero de refuerzo en columnas y muros

4.4.2 Vigas. En el caso de las vigas, los resultados se analizaron por piso. Con respecto al volumen de concreto no se presenta variación entre los dos análisis, ya que, para ambos casos las dimensiones de las vigas son las mismas. Sin embargo, las cantidades de acero de refuerzo en la figura 12 muestran un aumento del 5% para el análisis de base flexible, con respecto al análisis considerando la base fija.

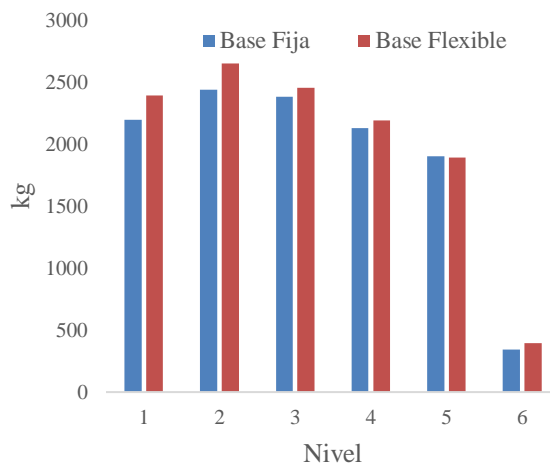


Figura 12. Cantidad de acero de refuerzo vigas

4.4.3 Cimentaciones. En las figuras 13 y 14 se muestra la cantidad de concreto y acero de refuerzo de las zapatas, respectivamente. No se incluyeron las cantidades de las vigas que hacen parte del sistema de cimentación, ya que estas son exactamente las mismas en los dos modelos, pues se diseñaron únicamente como vigas de amarre en ambos casos.

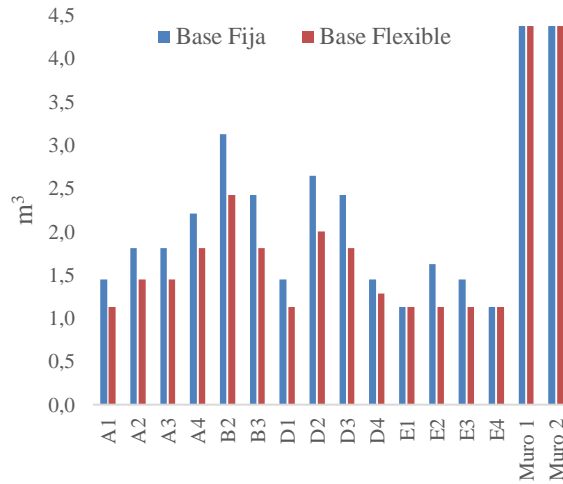


Figura 13. Cantidad de concreto en zapatas

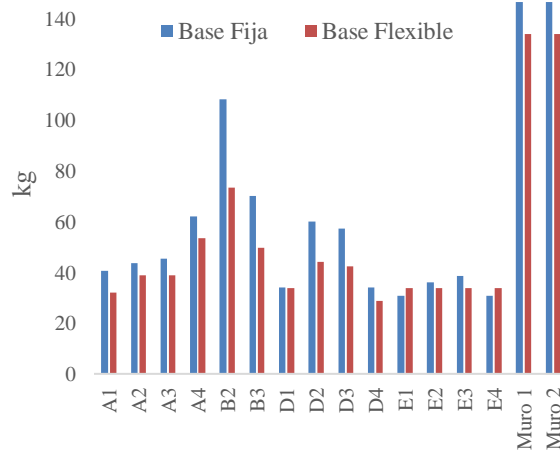


Figura 14. Cantidad de acero de refuerzo en zapatas

El volumen de concreto y acero de refuerzo en zapatas en el modelo de base flexible mostró reducción del 15% en el análisis considerando la base flexible. Estas variaciones están relacionadas con una disminución en las solicitaciones de servicio de la estructura.

4.5 Cantidades totales

En la **Tabla 6** se encuentran consignadas las cantidades totales para los dos diseños realizados, estos resultados expresan una disminución del 4% en el volumen total de concreto de la estructura y un aumento del 6% en el acero de refuerzo para el modelo de base flexible en referencia al modelo de base fija.

Tabla 6.

Comparación de cantidades totales

Material	B. Fija	B. Flexible
Volumen de concreto [m ³]	161	155
Cantidad de acero [kg]	30491	32436

5. Conclusiones

Se analizaron las solicitaciones y las cantidades de obra de una edificación por medio de dos alternativas de modelamiento de las condiciones de apoyo en la base, teniendo en cuenta interacción suelo-estructura y suponiendo la base fija. Los resultados fueron mostrados y analizados, a partir de estos se obtuvieron las siguientes observaciones:

La flexibilidad de los apoyos en el modelo de base flexible, se vio reflejada en una elongación del 5% en el periodo fundamental de la estructura en la dirección X, lo que indica una influencia leve de los efectos de interacción suelo-estructura sobre el periodo de la estructura analizada en el presente estudio.

La incorporación de la flexibilidad en la base y el amortiguamiento por radiación del sistema, no influyó de manera determinante el cortante basal de la estructura ya que presentó una variación del 1% en el modelo de base flexible con respecto al modelo de base fija. Esto se puede explicar, ya que el cortante basal en los dos análisis se mantuvo dependiente únicamente de la masa participante en los modos de vibración.

Al comparar las solicitaciones entre modelos (base flexible respecto a base fija) resalta el hecho que el momento máximo de diseño promedio para los muros en la base presente una reducción del 15%, mientras que en las columnas se presente un aumento del mismo valor. Esto se puede explicar como una redistribución de las solicitaciones, a causa de una disminución de la rigidez relativa entre muros y columnas para la edificación de estudio.

La inclusión de la flexibilidad en la base y el amortiguamiento por radiación en la edificación de estudio mostró en la edificación estudiada, un efecto de compensación sobre las cantidades de obra en muros estructurales y columnas del modelo de base flexible; lo que se vio reflejado en sus cantidades de acero de refuerzo en muros y columnas, mostrando una reducción del 27% en muros y un aumento del 16% en columnas con respecto al modelo de base fija.

Las cantidades de obra en vigas para los modelos estudiados, presentaron un aumento en el acero de refuerzo del 5% en el análisis de base flexible; esto revela una influencia moderada del tipo de modelamiento de la base para diseño, en las cantidades de acero de refuerzo en vigas.

En el modelo de base flexible las cantidades de obra en zapatas, se presentó una disminución del 15% en el volumen de concreto y acero de refuerzo en contraste con el modelo de base fija. Esto como consecuencia de una disminución en las solicitaciones de servicio para el dimensionamiento de las zapatas en la edificación de estudio.

La comparación de cantidades totales para la edificación de estudio, mostró una disminución del 4% en el volumen de concreto y un aumento en las cantidades de acero de refuerzo del 6% cuando se tienen en cuenta los efectos de interacción suelo estructura (flexibilidad en la base y amortiguamiento por radiación). Lo cual indica un efecto moderado de la consideración de los efectos de interacción suelo-estructura en las cantidades de obra.

Referencias Bibliográficas

- Anoyatis, G., & Mylonakis, G. (2012). *Dynamic Winkler modulus for axially loaded piles*, (6), 521–536.
- Asociación colombiana de ingeniería sísmica. (2010) *Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente: Título A, B, C y H*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica,
- Áviles, J. (1999). *Interacción suelo-estructura: Conceptos de diseño*. Revista de Ingeniería Sísmica.
- Bolisetti, C. (2015). *Site response, soil-structure interaction and structure-soil-structure interaction for performance assessment of buildings and nuclear structures*. ProQuest Dissertations and Theses. Retrieved from http://search.proquest.com/docview/1658211292?accountid=40695%5Cnhttp://sfxhosted.exlibrisgroup.com/polymtl?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+&+theses&sid=ProQ:ProQuest+Dissertations+&+Theses+A&I&atit
- Choinière, M., Paultre, P., & Léger, P. (2019). *Influence of soil-structure interaction on seismic demands in shear wall building gravity load frames*. *Engineering Structures*, 198(May), 109259. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.100>
- Fatahi, B., Ph, D., Asce, M., Huang, B., & Yeganeh, N. (2020). *Three-Dimensional Simulation of Seismic Slope – Foundation – Structure Interaction for Buildings Near Shallow Slopes*. ASCE, 20(1), 1–20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001529)
- FEMA. (2009). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and other Structures*. Washington, D.C: prepared by the Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building science for the Federal Emergency Management Agency.
- Gazetas, G. (1991). *Foundation Vibrations*.

- Jurado, C. (2012). *Problemas de interaccion suelo-estructura en cimentaciones y muros de contención. Influencia de los fenómenos de despegue y deslizamiento*. Tesis Doctoral, Madrid.
- Khosakitchalert, C., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2019). *Improving the accuracy of BIM-based quantity takeoff for compound elements*. *Automation in Construction*, 106(July), 102891. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102891>
- Khosravikia, F., Mahsuli, M., & Ghannad, M. A. (2018). *Soil-Structure Interaction in Seismic Design Code: Risk-Based Evaluation*. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4(4), 1–13. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000984>
- Kim, D. K. (2014). *Effect of soil-basement interaction on seismic responses of structures*, 457–464.
- Liu, H., Lu, M., & Al-hussein, M. (2016). *Advanced Engineering Informatics Ontology-based semantic approach for construction-oriented quantity take-off from BIM models in the light-frame building industry*. *ADVANCED ENGINEERING INFORMATICS*, 30(2), 190–207. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.001>
- Lou, M., Wang, H., Chen, X., & Zhai, Y. (2011). *Structure-soil-structure interaction: Literature review*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(12), 1724–1731. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.07.008>
- Miettinen & Paavola. (2014). *Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling*. *Automation in Construction*, 43, 84–91. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.009>
- Monteiro, A., & Martins, J. P. (2013). *Automation in Construction A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design*. *Automation in Construction*, 35, 238–253. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.005>
- Motamedi, A., & Hammad, A. (2009). *RFID-Assisted Lifecycle Management of Building Components Using BIM Data*. *International Symposium on AUTOMATION and ROBOTICS in CONSTRUCTION*. Isarc.

- Mylonakis, G., Nikolaou, S., & Gazetas, G. (2006). *Footings under seismic loading : Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations*, 26, 824–853. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.12.005>
- National Building Information Modeling Standard (NBIMS). (2014). *Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling*. *Automation in Construction*, 43, 84–91.
- National Building Information Modeling Standard. (2015). *Overview, Principles and Methodologies*. Obtenido de https://www.nationalbimstandard.org/files/NBIMS-US_FactSheet_2015.pdf
- National Institute of Building Sciences. (2007). *United States National Building Information Modeling Standard Version 1 - Part 1: Overview, Principles, and Methodologies*. Obtenido de https://buildinginformationmanagement.files.wordpress.com/2011/06/nbimsv1_p1.pdf
- NEHRP Consultants Joint Venture. (2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. <https://doi.org/12-917-21>
- Nilson, A. (2001). *Diseño de estructuras de concreto*. Santa fé de Bogotá: McGRAW-HILL, Inc.
- Pais, A., & Kausel, E. (1988). *Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations*.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers* (Tercera edición.). Wiley.
- Stewart, J. P., Bielak, J., & Dobry, R. (2003). *Revisions to Soil-Structure Interaction Procedures in NEHRP Design Provisions*, (August). <https://doi.org/10.1193/1.1596213>
- Uchiyama, S., Tonouchi, K., & Imai, T. (1984). *Measurement of S wave velocity of the ground and application of S wave velocity data for civil engineering*. Oyo Technical Note N° 52.
- Zeevaert, L. W. (1980). *Interacción suelo - estructura de cimentación*. (LIMUSA S.A, Ed.). México D.F.

Zeevart, L. (1980). *Interaccion de suelo-estructura superficiales y profundas, sujetas a cargas estáticas y sísmicas* (Primera Edición ed.). Mexico D.F: Editorial Limusa.