



Influencia del mejoramiento del perfil sísmico del suelo en el diseño de pórticos de concreto reforzado: Revisión de literatura y caso de estudio

Juan David Castañeda Acevedo

Sebastián Colorado Restrepo

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

Asesor

Romis Fernando Vides Peña, Magíster (MSc) en Ingeniería Sísmica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita	(Castañeda Acevedo & Colorado Restrepo, 2023)
Referencia	Castañeda Acevedo, J. D., & Colorado Restrepo, S. (2023). <i>Influencia del mejoramiento del perfil sísmico del suelo en el diseño de pórticos de concreto reforzado: Revisión de literatura y caso de estudio</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte X.



Centro De Documentación Ingeniería (CENCOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Tabla de contenido

Resumen.....	8
Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
2. Objetivos.....	12
3. Marco teórico.....	13
4. Metodología.....	21
5. Caso de Estudio.....	22
5.1. Descripción.....	22
5.2. Caso de Estudio 1.....	25
5.2.1. Perfil sísmico E – Estudio Geotécnico.....	25
5.2.2. Espectro elástico de aceleraciones de diseño – Perfil sísmico E.....	25
5.2.3. Modelo Estructural.....	27
5.2.4. Resultados.....	39
5.2.5. Presupuesto.....	41
5.3. Caso de Estudio 2.....	43
5.3.1. Perfil sísmico D – Estudio Geotécnico.....	43
5.3.2. Espectro elástico de aceleraciones de diseño – Perfil sísmico D.....	43
5.3.3. Modelo Estructural.....	45
5.3.4. Resultados.....	58
5.3.5. Presupuesto.....	60
6. Análisis de Resultados.....	62
7. Conclusiones.....	63
8. Referencias.....	64

9. Anexos	65
-----------------	----

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de casos de estudio donde se implementaron métodos de mejoramiento de suelos. Elaboración Propia.....	19
Tabla 2. Coeficientes sísmicos para determinar el espectro de diseño - Perfil sísmico E.....	26
Tabla 3. Participación de Masa para el caso de estudio 1	41
Tabla 4. Presupuesto de superestructura del caso de estudio 1.....	42
Tabla 5. Coeficientes sísmicos para determinar el espectro de diseño - Perfil sísmico D.	44
Tabla 6. Participación de Masa para el caso de estudio 2.	60
Tabla 7. Presupuesto de superestructura del caso de estudio 2.....	61
Tabla 8. Listado de precios de materiales e insumos.	65
Tabla 9. Listado de precios de alquiler de equipos.	65
Tabla 10. Precio de mano de obra.	66
Tabla 11. Análisis de Precio Unitario de la Excavación Mecánica.....	66
Tabla 12. Análisis de Precio Unitario del lleno de material seleccionado.	67
Tabla 13. Análisis de Precio Unitario de S.T.I. de acero de refuerzo de 420 Mpa.	68
Tabla 14. Análisis de Precio Unitario de S.T.I. de concreto de 35 Mpa.	69
Tabla 15. Análisis de Precio Unitario de S.T.I. de concreto de 28 Mpa.	70
Tabla 16. Memoria de cantidades para caso de estudio 1.....	71
Tabla 17. Memoria de cantidades para caso de estudio 2.....	72

Lista de figuras

Figura 1. Clasificación de los perfiles de suelo. Fuente: (AIS, 2010).....	13
Figura 2. Coeficiente de amplificación F_a del suelo para la zona de períodos cortos del espectro. Fuente: (AIS, 2010).....	14
Figura 3. Coeficiente de amplificación F_v del suelo para la zona de períodos intermedios del espectro. Fuente: (AIS, 2010).	14
Figura 4. Espectro elástico de aceleraciones para perfiles de suelo para cada perfil de suelo A, B, C, D y E.	15
Figura 5. Soluciones Geopier. Obtenido en: https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/02/12/geopier-columnas-de-grava-compactada/	17
Figura 6. Elevación estructural representativa de le estructura analizada. (Vides. V. F., 2023). ...	22
Figura 7. Planta arquitectónica de piso típico de la estructura analizada. (Vides. V. F., 2023). ...	23
Figura 8. Modelo estructural caso estudio-Edificación 10 niveles.	24
Figura 9. Espectro Elástico de Aceleración de Diseño como fracción de g para perfil sísmico E. (Elaboración Propia).....	26
Figura 10. Material de 28 MPa para caso de estudio 1- Etabs.....	28
Figura 11. Propiedades del material de 28 MPa para caso de estudio 1 - Etabs.....	28
Figura 12. Material de 35 MPa para caso de estudio 1 - Etabs.....	29
Figura 13. Propiedades del material de 35 MPa para caso de estudio 1 - Etabs.....	29
Figura 14. Secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.....	30
Figura 15. Propiedades secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.....	30
Figura 16. Secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.....	31
Figura 17. Propiedades secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.	31
Figura 18. Vista en planta de columnas para el caso de estudio 1 - Etabs	32
Figura 19. Vista en planta de vigas para el caso de estudio 1 - Etabs.....	32
Figura 20. Propiedades de losa para el caso de estudio 1 - Etabs	33
Figura 21. Factor de modificación de rigidez para el caso de estudio 1 – Etabs	33

Figura 22. Cargas vivas para el caso de estudio 1 – Etabs	34
Figura 23. Cargas vivas en escaleras para el caso de estudio 1 – Etabs.....	35
Figura 24. Cargas muertas para el caso de estudio 1 – Etabs	36
Figura 25. Cálculo de cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 1 – Etabs	37
Figura 26. Cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 1 – Etabs.....	37
Figura 27. Factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 1 – Etabs	38
Figura 28. Vista en 3D factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 1 – Etabs.....	38
Figura 29. Masa sísmica para el caso de estudio 1 – Etabs	39
Figura 30. Derivas Eje Y para el caso de estudio 1 – Etabs	40
Figura 31. Derivas Eje X para el caso de estudio 1 – Etabs	40
Figura 32. Espectro Elástico de Aceleración de Diseño como fracción de g para perfil sísmico D. (Elaboración Propia).....	45
Figura 33. Material de 28 MPa para caso de estudio 2- Etabs.....	46
Figura 34. Propiedades del material de 28 MPa para caso de estudio 2 - Etabs.....	47
Figura 35. Material de 35 MPa para caso de estudio 2 - Etabs.....	47
Figura 36. Propiedades del material de 35 MPa para caso de estudio 2 - Etabs.....	48
Figura 37. Secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 2 – Etabs	48
Figura 38. Propiedades secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 2 - Etabs.....	49
Figura 39. Secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 2 - Etabs.....	49
Figura 40. Propiedades secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 2 - Etabs.	50
Figura 41. Vista en planta de columnas para el caso de estudio 2 – Etabs.....	50
Figura 42. Vista en planta de vigas para el caso de estudio 2 - Etabs.....	51
Figura 43. Propiedades de losa para el caso de estudio 2 - Etabs	51
Figura 44. Factor de modificación de rigidez para el caso de estudio 2 – Etabs	52
Figura 45. Cargas vivas para el caso de estudio 2 – Etabs	52

Figura 46. Cargas vivas en escaleras para el caso de estudio 2 – Etabs.....	53
Figura 47. Cargas muertas para el caso de estudio 2 – Etabs	54
Figura 48. Cálculo de cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 2 – Etabs	55
Figura 49. Cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 2 – Etabs.....	55
Figura 50. Factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 2 – Etabs	56
Figura 51. Vista en 3D factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 2 – Etabs.....	56
Figura 52. Masa sísmica para el caso de estudio 2 – Etabs	57
Figura 53. Factor de ajuste a la cortante basal para el caso de estudio 2 – Etabs	57
Figura 54. Factor de ajuste a la cortante basal para el caso de estudio 2 – Etabs.	58
Figura 55. Derivas Eje Y para el caso de estudio 2 – Etabs	59
Figura 56. Derivas Eje X para el caso de estudio 2 – Etabs	59

Resumen

El perfil sísmico del suelo es un parámetro fundamental en el diseño sísmico de estructuras, ya que influye en la magnitud de la fuerza sísmica lateral de diseño y la respuesta global de la estructura ante dicha fuerza. En los análisis sísmicos elásticos convencionales, los parámetros asociados al perfil sísmico del suelo se utilizan para generar un espectro elástico de aceleraciones de diseño. En términos generales, entre menor rigidez tengan los suelos, los parámetros referidos conducen a mayores aceleraciones de diseño, lo que equivale a mayores sollicitaciones sísmicas en la estructura, generando, en términos generales, mayores dimensiones y cuantías en los elementos estructurales.

En la presente monografía se analiza un caso de estudio que considera una estructura residencial de concreto reforzado, de 10 pisos, sometida a fuerzas sísmicas laterales obtenidas para diferentes perfiles sísmicos del suelo. Los análisis consideran dos escenarios de suelo: un primer escenario donde se mantiene las condiciones iniciales del suelo, sin modificar sus propiedades físicas y mecánicas, correspondiente a un perfil sísmico E, y un segundo escenario considerando el mejoramiento del suelo mediante relleno de material seleccionado compactado correspondiente a un perfil sísmico D.

Finalmente, se analizan los resultados correspondientes a los dos escenarios planteados, donde se efectúa la adecuada comparación de datos como cambio en dimensiones y cuantías de elementos estructurales, variación del presupuesto, derivas y desplazamientos de la estructura, cortante basal, periodos, y se determinara el caso más factible sin comprometer la seguridad de la estructura.

Palabras clave: Perfil sísmico, mejoramiento del suelo, estructura, derivas, periodo, cortante basal, presupuesto.

Abstract

The seismic profile of the soil is a fundamental parameter in the seismic design of structures since it influences the magnitude of the design lateral seismic force and the overall response of the structure when subjected to such a force. In conventional elastic seismic analyses, the parameters associated with the seismic profile of the soil are used to generate an elastic design acceleration spectrum. In general terms, the less rigidity the soils have, the referred parameters lead to greater design accelerations, which is equivalent to greater seismic demands on the structure, generating, in general terms, greater dimensions and quantities in the structural elements.

In this monograph, a case study is analyzed that considers a 10-story reinforced concrete residential structure, subjected to lateral seismic forces obtained for different seismic soil profiles. The analyzes consider two soil scenarios: a first scenario where the initial soil conditions are maintained, without modifying its physical and mechanical properties, corresponding to a seismic profile E, and a second scenario considering the improvement of the soil by replacing the initial soil with selected compacted material, corresponding to a seismic profile D.

Finally, the results corresponding to the two proposed scenarios are analyzed, where the appropriate comparison of data is made, such as change in dimensions and quantities of structural elements, budget variation, inter-story drifts and displacements of the structure, seismic base shear, periods of vibrations and, in overall, the most feasible case, without compromising the safety of the structure, is determined.

Keywords: Seismic profile, soil improvement, structure, drifts, period, basal shear, budget.

1. Introducción

Uno de los grandes obstáculos y dificultades que enfrenta el campo del diseño de pórticos de concreto reforzado, es contar con unas condiciones desfavorables en las características físicas y mecánicas del suelo en el sitio donde se desarrollará el proyecto. Normalmente, esto genera grandes dimensiones y cantidades de refuerzo en los elementos estructurales que conforman el pórtico (columnas, vigas, muros y cimentación).

Al contar con características físicas y mecánicas desfavorables del suelo, según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, se genera un perfil sísmico que refleja bajas características de resistencia, es decir que el estrato de suelo de estudio presenta un bajo número de golpes por pie obtenido en el ensayo de penetración estándar (N), menor resistencia al corte no drenado (S_u) y menor velocidad media de la onda cortante del estrato (V_s).

Usualmente, el perfil sísmico del suelo se determina a partir de datos y estudios geotécnicos realizados en los 30 m superiores del mismo, clasificado según el tipo de suelo y el valor de la velocidad media de la onda de cortante. Adicionalmente, el tipo del perfil sísmico describe los factores de ampliación del espectro F_a y F_v , generando un espectro de diseño utilizado en el análisis sísmico de las estructuras, donde entre menor rigidez tengan los suelos, el perfil de suelo resultante conduce a mayores aceleraciones de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, para un periodo de vibración determinado, lo que equivale a mayores sollicitaciones sísmicas en la estructura.

Al realizar la búsqueda de alternativas para economizar la construcción de estructuras de concreto reforzado, se ha encontrado que una de ellas puede ser el cambio del perfil sísmico, ya que al mejorar las condiciones del suelo se reducen las acciones sísmicas que se utilizan en el proceso de análisis y diseño de la estructura, utilizadas en los modelos matemáticos, representando una reducción de secciones transversales y refuerzo en los elementos estructurales.

Como base para el desarrollo de la presente monografía se tiene en primera instancia la bibliografía de referencia, que permite tener un acercamiento con metodologías empleadas para el mejoramiento del perfil sísmico del suelo. En términos generales, allí se plantea una opción para el mejoramiento del suelo que consiste en el reemplazo de suelo por material seleccionado debidamente compactado.

Para el objeto de esta investigación, se realiza el análisis de la influencia del mejoramiento del perfil sísmico del suelo en el diseño de pórticos de concreto reforzado. Para esto se realiza el análisis de dos escenarios, uno utilizando la modelación de una estructura en un perfil de suelo específico mediante programas de computador estructurales y recreando el suelo con las condiciones iniciales; y, un segundo escenario, utilizando la modelación de la misma estructura, pero recreando el suelo con el perfil sísmico mejorado. Acto seguido se realiza la comparación y análisis de resultados globales, como cambio en dimensiones y cuantías de elementos estructurales, variación del presupuesto, derivas y desplazamientos de la estructura, cortante basal, periodos, y se determinara el caso más factible sin comprometer la seguridad de la estructura.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica y caso de estudio para analizar la influencia del mejoramiento del perfil sísmico del suelo en el diseño de pórticos de concreto reforzado.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar conceptos teóricos y normativa vigente que rigen el mejoramiento del perfil sísmico
- Obtener y documentar procesos y parámetros técnicos de mejoramientos de suelos que permitan la mejora de los perfiles sísmicos del suelo.
- Analizar una propuesta de mejoras suelos donde se compruebe la mejora del perfil sísmico de suelo y valorar el costo de los mismos.
- Desarrollar un caso ejemplo de estructuras de pórticos de concreto reforzado al que se le apliquen dos perfiles de suelo sísmico y valorar el comportamiento de dicha estructura y la variación en costos asociados a la construcción de esta.
- Realizar una comparación costo - beneficio de mejoramiento de suelos versus reducción de costos de estructura (concretos, aceros y estructuras de contención) enfocada en la súper estructura.
- Presentar las hipótesis que se plantean y los resultados obtenidos en la influencia en el diseño de pórticos de concreto reforzado al considerar metodologías de mejoramiento del perfil sísmico del suelo.

3. Marco teórico

Un pórtico es una estructura conformada por elementos reticulares unidos, generalmente por juntas rígidas y articuladas, las cuales soportan fuerzas axiales, fuerzas cortantes y momentos flectores (AIS, 2010).

A lo largo del tiempo se ha querido obtener métodos de diseño estructural en los cuales se puedan reducir los costos sin comprometer la calidad y la seguridad. Las estructuras nuevas deben ser capaces de resistir los efectos o cargas impuestas por las acciones sísmicas y de uso, por lo tanto, en el diseño se debe considerar condiciones propias del sitio o efectos locales, donde uno de ellos es el perfil de suelo, el cual es determinado por datos y estudios geotécnicos realizados en el sitio. El perfil o tipo del suelo se clasifica en A, B, C, D, E, F y dicha clasificación se hace, normalmente, a partir del análisis de velocidades medias de ondas de corte en los 30 m superiores del suelo, V_{s30} (véase Figura 1).

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Figura 1. Clasificación de los perfiles de suelo. Fuente: (AIS, 2010).

A partir del perfil sísmico se determinan los factores de ampliación del espectro F_a y F_v del suelo (véase Figura 2 y 3), donde F_a es el coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio, adimensional, y F_v es el coeficiente de ampliación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio, adimensional. (AIS, 2010).

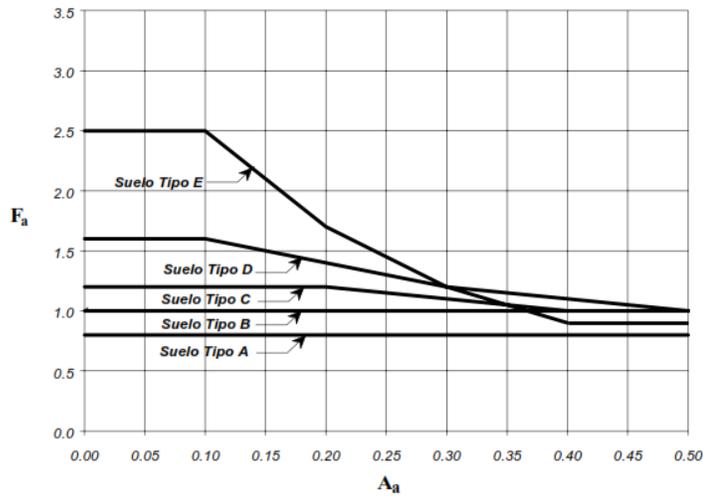


Figura 2. Coeficiente de ampliación F_a del suelo para la zona de períodos cortos del espectro. Fuente: (AIS, 2010).

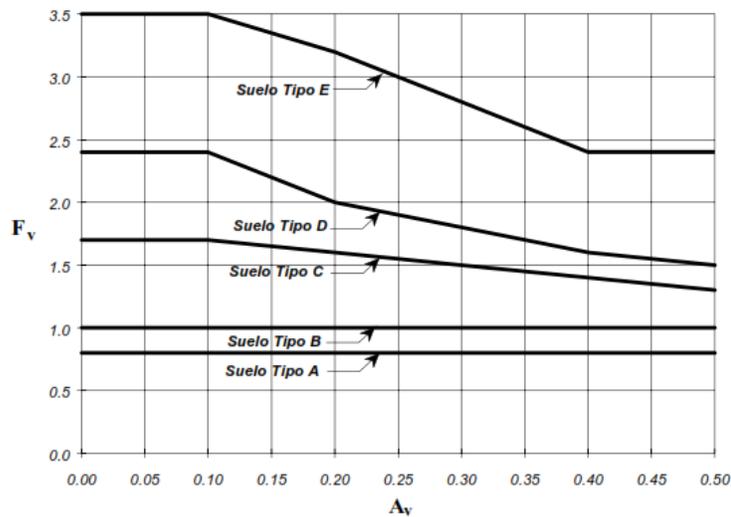


Figura 3. Coeficiente de ampliación F_v del suelo para la zona de períodos intermedios del espectro. Fuente: (AIS, 2010).

Para la etapa de diseño también se tiene en cuenta los coeficientes A_a y A_v (véase Figura 2 y 3), donde A_a es el coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva, para diseño, y A_v es el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva, para diseño.

Los factores descritos anteriormente son utilizados para la elaboración del espectro elástico de aceleraciones de diseño, el cual es la herramienta fundamental para el diseño sísmico y representa los movimientos sísmicos de diseño, siendo una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona en específico, por consiguiente, para cada tipo de perfil sísmico se obtiene un espectro de diseño diferente (Vélez J. & Castañeda F., 2011) (véase Figura 4), donde, entre menor rigidez tengan los suelos, el perfil de suelo resultante conduce a mayores aceleraciones de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, para un periodo de vibración determinado. (AIS, 2010).

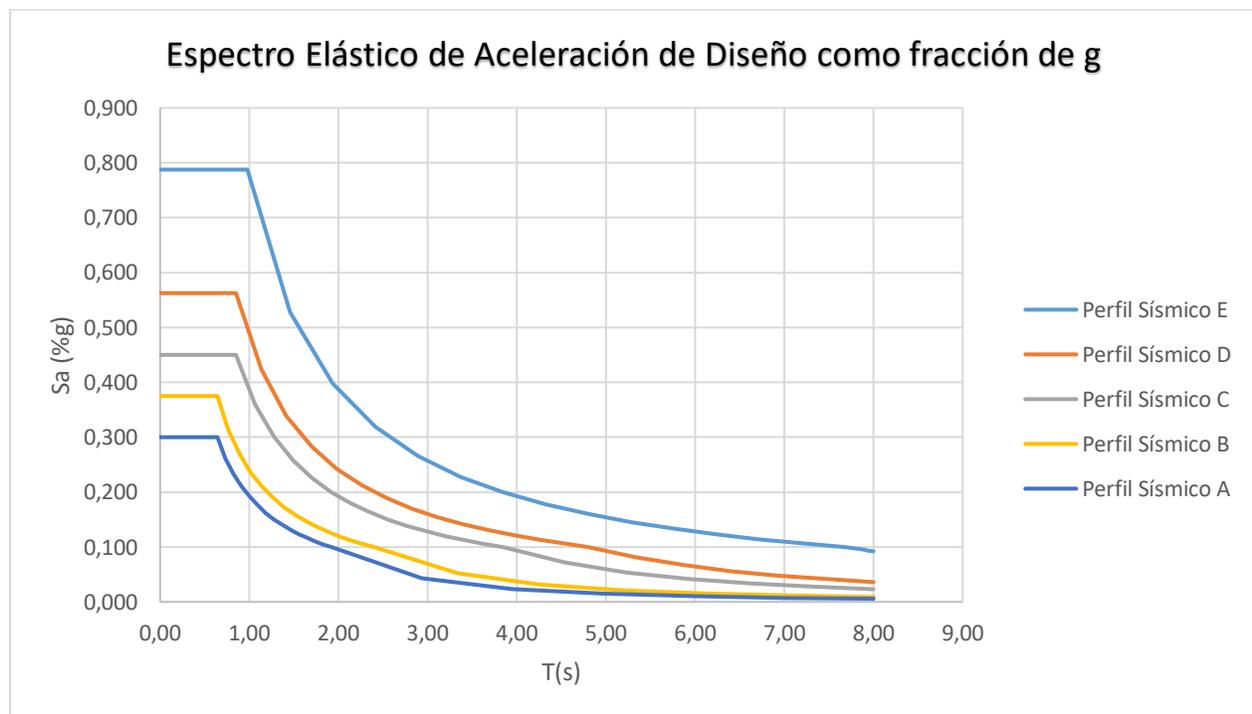


Figura 4. Espectro elástico de aceleraciones para perfiles de suelo para cada perfil de suelo A, B, C, D y E.

Se puede evidenciar que, al mejorar los perfiles sísmicos de suelo, se pueden reducir los coeficientes de aceleración para diseñar, logrando reducir las fuerzas sísmicas aplicadas a la estructura, por lo tanto, se reducirán las secciones y/o cuantías de refuerzo finales.

Los mejoramientos de suelo son procesos, tecnologías o tratamientos aplicadas al terreno, con el objetivo de mejorar las condiciones físicas o mecánicas del mismo, mejorando la capacidad de cortante del suelo y por consiguiente se incrementa la capacidad de carga de cimentaciones superficiales, obteniendo un suelo más firme, estable y capaz de resistir las sollicitaciones (Braja M Das, 1983).

Con base a los procedimientos de mejoras de suelo, se puede modificar la velocidad media de la onda cortante y el tipo de perfil del suelo, generando una disminución de las cargas sísmicas actuando en la estructura, donde se podrá cuantificar y comparar las reducciones de costos en la estructura y determinar la viabilidad o no de los mismos.

Actualmente, se visualiza que, a nivel mundial, se están realizando recomendaciones e implementando metodologías, procesos o tecnologías de mejoramiento de características físicas y mecánicas de los suelos, con el fin de mejorar las condiciones de los mismos, y así obtener un comportamiento más adecuado del mismo, ya que en el proceso de diseño y exploración del terreno objeto del proyecto, no siempre se encuentran suelos de buenas condiciones mecánicas aptas para el soporte de diversas estructuras.

También se puede apreciar en el medio de la construcción que es muy común que la viabilidad de las construcciones, por lo general, radica en el costo de las mismas, por lo que es una práctica muy común buscar alternativas que puedan reducir los costos de construcción sin poner en riesgo la seguridad ni la integridad de la estructura. Estas alternativas son, por lo general, viables en construcciones en altura, toda vez que los costos de construcción pueden ser más marcados en este tipo de estructuras.

Debido al crecimiento exponencial de la población mundial se aumenta la densidad de la misma, y esto obliga a optar por la construcción de estructuras en altura, por consiguiente, los métodos y tecnologías de mejoramientos de suelo podrán optimizar costos sin poner en riesgo la seguridad de las estructuras, logrando así tener mayores espacios habitacionales a menor costo.

Los procesos más comunes empleados en el mejoramiento de suelo para el soporte de estructuras es la excavación y/o sustitución, eliminando los estratos de suelo con peores condiciones de resistencia y sustituyendo con llenos de material de mejores condiciones físicas y mecánicas, también se utiliza con frecuencia los rellenos estructurales, los pozos de cimentación y precargas. (Moreno, J. 2019).

Adicionalmente, en la actualidad se está desarrollando e implementando nuevas tecnologías que han mostrado resultados satisfactorios, como es la instalación de columnas de grava compactadas o inclusión rígida (Véase figura 5), los cuales son soluciones intermedias o semi-profundas aplicadas en terrenos sueltos, cohesivos blandos o terrenos compresibles. En este procedimiento se reemplaza una porción o columna de suelo por sucesivas capas de material de agregados compactados adecuadamente, dando como resultado una sobre - consolidación del mismo, una elevación en la rigidez del elemento construido. Esto permite la reducción y limitación de los asentamientos de manera muy eficaz, además de mejorar la capacidad de cortante del suelo, la capacidad portante y mitigación del efecto de licuefacción en suelo ubicados en zona de amenaza sísmica alta. (Moreno, J. 2019).



Figura 5. Soluciones Geopier. Obtenido en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/02/12/geopier-columnas-de-grava-compactada/>

Desde 1988 se ha estado utilizando la metodología de las columnas de grava compactada - Geopier, con el fin de servir de soporte de sistemas de cimentación superficial, como zapatas y losas de cimentación, logrando controlar los asentamientos de estructuras de hasta 16 niveles. Además, el sistema Geopier mejora la matriz del suelo densificando el suelo adyacente, ya que se comporta como un resorte rígido dentro de dicha matriz (Carmona J.A., 2019).

En ocasiones, el terreno está conformado por un estrato de suelo compuesto por materiales de bajas características físicas y mecánicas; donde una posible solución para mejorar las condiciones del suelo es la extracción del material existente y el reemplazo por un material de mejores características. Dicho procedimiento se denomina sustitución (Doroteo, C. 2014).

El método de sustitución también es conocido como remplazo total o parcial de suelos natural por rellenos granulares compactados, el cual consiste en la sustitución parcial del terreno natural por un material de suelo de préstamo adecuado con mejores propiedades físicas y de resistencia. El procedimiento consiste en la extracción del perfil del suelo y en la posterior colocación del material de préstamo por capas, compactados adecuadamente y con la humedad óptima establecida en ensayos de laboratorio, hasta alcanzar la máxima densidad seca, la cual debe ser verificada en campo y comparada con los resultados del ensayo de Proctor (Jiménez, M.C., Otálvaro, G. A. 2020)

Durante la ocurrencia de un evento sísmico se generan esfuerzos adicionales en la estructura por el aumento de cargas que debilita la respuesta estructural ante las aceleraciones y el desarrollo de fuerzas inerciales, lo que representa grandes exigencias en las fundaciones. Por tanto, al obtener un suelo con mejores condiciones físicas y mecánicas, implementado métodos de mejoramiento del suelo, se genera un aumento considerable de la capacidad de soporte y de la resistencia ante fuerzas laterales, además, las fundaciones apoyadas preservan su integridad luego de un evento sísmico. (Bello, C. 2013).

Los sistemas de cimentación superficiales de pórticos soportados por suelos mejorados se comportan más favorablemente ante las fuerzas estáticas y sísmicas, ya que se aumenta la resistencia cortante o capacidad portante del suelo, también se mejora la fricción entre el elemento

de cimentación y el suelo adyacente. En el caso de los elementos de sistemas de cimentación profundas ocurre algo similar, se mejora el comportamiento de los mismos al resistir las cargas estáticas y las cargas sísmicas, ya que aumenta la fricción e interacción entre el elemento y la pared del suelo mejorado y mejora la resistencia al corte debajo de la fundación o resistencia por punta. (Bello, C. 2013).

A continuación, se presenta una tabla que relacionan algunos trabajos reportados en proyectos de investigación y casos de estudio donde implementaron métodos de mejoramiento de suelos.

Referencia	Título	Proyecto	Ubicación del proyecto	Características del suelo sin mejorar	Método de mejoramiento de suelo empleado	Características del suelo mejorado
Huaman Q. (2018)	Mejoramiento Del Suelo Arcilloso Utilizando Geoestructuras De Geopier Para Una Edificación En La Avenida Juan Lecaros Frente Al Estadio Municipal De Puente Piedra, 2018	Edificación en la Avenida Juan Lecaros	Distrito de Puente Piedra, Lima - Perú	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad 1.478 g/cm³ - Grado de Compactación 78% - Suelo Limo Arcilloso con limite liquido menor a 50 - Resistencias mecánicas del suelo 0.76 kg/cm² - Asentamiento del suelo 87 mm 	Geoestructura de Geopier (Pilas de grava compactada)	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad 1.665 g/cm³ - Grado de Compactación 95% - Resistencias mecánicas del suelo 5 kg/cm² - Asentamiento del suelo 3 mm
Aravena J et al. (2016)	Análisis de Desempeño de una Estructura Compleja Sometida a Cambios en la Rigidez de du Suelo de Fundación	Estructura de hormigón armado de 16 pisos, con un subterráneo. Está compuesto por dos torres, con una altura de 46 metros.	Concepción, Chile	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de propagación de onda de corte Vs30 de 264 m/s. - Suelo tipo D. - Deriva dirección longitudinal 1.3 %. - Deriva dirección transversal 1.6 % 	Relleno por Vibrosustitución	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de propagación de onda de corte Vs30 de 400 m/s. - Suelo tipo C. - Deriva dirección longitudinal 1.1 % - Deriva dirección transversal 1.25 %
Bello C. A. (2013)	Primera Experiencia Colombiana en Construcción de Pilas de Agregado Compacto – Geopier Impact – en un Proyecto de Vivienda de Interés Social	Conjunto Residencial Torres de Lucerna. proyecto de vivienda de interés social (VIS), integrado por 14 torres de 12 pisos.	Localidad de Bosa, Bogotá, Colombia	<ul style="list-style-type: none"> - Perfil del suelo según la NSR-98 es S2. - Capacidad portante de 10.89t/m². 	Agregado Compacto – Geopier Impact	Se analizaron 3 alternativas de cimentación: Pilotes Pre-excavados, Placa - Pilotes Pre-excavados y Pilas de Agregado Compacto – Geopier Impact, donde se eligió la última como la más factible, ya que Incrementan la densidad relativa del suelo, Requieren menor longitud en profundidad, asentamientos bajos, Contribuyen a mitigar fenómenos de licuación por sismo. .

Tabla 1. Comparación de casos de estudio donde se implementaron métodos de mejoramiento de suelos. Elaboración Propia.

El desempeño sísmico de una estructura compleja es ampliamente afectado por la interacción que existe entre el suelo y la estructura, lo que conlleva a variaciones en la rigidez del respectivo suelo de fundación, produciendo cambios en su desempeño referidos en la literatura. (Aravena J. & Fuentes A., 2016)

Ahora bien, desde la parte económica se obtiene una ventaja al aplicar los métodos de mejoramiento del suelo en el diseño y construcción de una edificación, ya que al mejorar la capacidad portante del suelo se disminuye la cantidad de concreto y acero considerado en el prediseño (Huaman M., 2018)

El caso de estudio se enfocará en lograr mediante los diferentes métodos de mejora y/o reemplazo de suelo una variación en la rigidez y la reducción en la velocidad media de onda de corte (V_{s30}), logrando así generar cambio en el perfil sísmico del suelo.

Se tendrán dos campos de estudio, los cuales serán analizados para obtener las respectivas conclusiones. Para el primer caso se plantea la modelación de una estructura apoyada en condiciones del suelo iniciales compuesto por características físicas y mecánicas desfavorables.

Para el segundo caso se planteará el remplazo total o parcial de suelos natural por rellenos granulares compactados, realizando la remoción del perfil estratigráfico de menores características mecánicas (por lo general están en los estratos superiores) y logrando mejorar el perfil sísmico, cuantificando el valor de estas excavaciones y del material de reemplazo.

Se analizará una estructura de 10 pisos, la cual tenga ya la respectiva revisión y se garantice su total cumplimiento de la Normativa Sismo Resistente Colombiana NSR-10 cuando se someta a los movimientos sísmicos de diseño asociados a un perfil sísmico de suelo tipo E. Esta estructura tendrá un cambio en el planteamiento estructural y se hará la respectiva modificación del perfil sísmico de suelo a tipo D. Allí se generarán los nuevos espectros de aceleraciones de diseño y se aplicarán al modelo matemático analizando los nuevos resultados generados.

4. Metodología

Para alcanzar el objetivo propuesto de la presente monografía, se plantea los siguientes pasos a seguir:

- Revisión de literatura: Corresponde a la revisión y estudio de los métodos de mejoramientos de suelos para el cambio del perfil sísmico, investigación del estado del arte, búsqueda de documentos científicos que describan la interacción suelo – estructura, búsqueda de documentos de investigación donde se analice el comportamiento de una estructura sobre suelos con diferentes propiedades de resistencia, investigación de antecedentes y selección de casos de estudio a emplear.

- Modelación de cada caso de estudio: Se selecciona una estructura de concreto reforzado de 10 niveles de uso residencial, ubicado en el municipio de la Ceja, Antioquia. Para esto se utiliza un software de diseño estructural para el análisis. Se tendrán dos casos de estudio, el primer caso se plantea la modelación de la estructura apoyada en condiciones del suelo iniciales compuesto por características físicas y mecánicas desfavorables, correspondiente a un perfil sísmico tipo E. Para el segundo caso se planteará el remplazo total o parcial de suelos natural por rellenos granulares compactados, logrando remover el perfil estratigráfico de menores características mecánicas, logrando mejorar el perfil sísmico a tipo D.

- Análisis de la variación de resultados: Se realiza el respectivo estudio y análisis de resultados correspondientes a cada caso de estudio. Se analiza el cambio en dimensiones y cuantías de elementos estructurales, variación del presupuesto, derivas y desplazamientos de la estructura, cortante basal, periodos, y se determinara el caso más factible sin comprometer la seguridad de la estructura.

5. Caso de Estudio

5.1.Descripción

Como caso estudio se tiene una estructura compuesta por pórticos de concreto reforzado de 10 niveles de uso residencial, ubicado en el Municipio de la Ceja – Antioquia. La estructura es regular en planta y en altura; además, todos los pisos son de la misma altura (3.00 m). La estructura se analiza con los parámetros de la NSR-10 (Norma Sismo Resistente) y se le efectúa unos de los chequeos más importantes como son el cumplimiento de derivas y participación de masa. Se compararon también en ambos modelos la cortante en la base y los periodos.

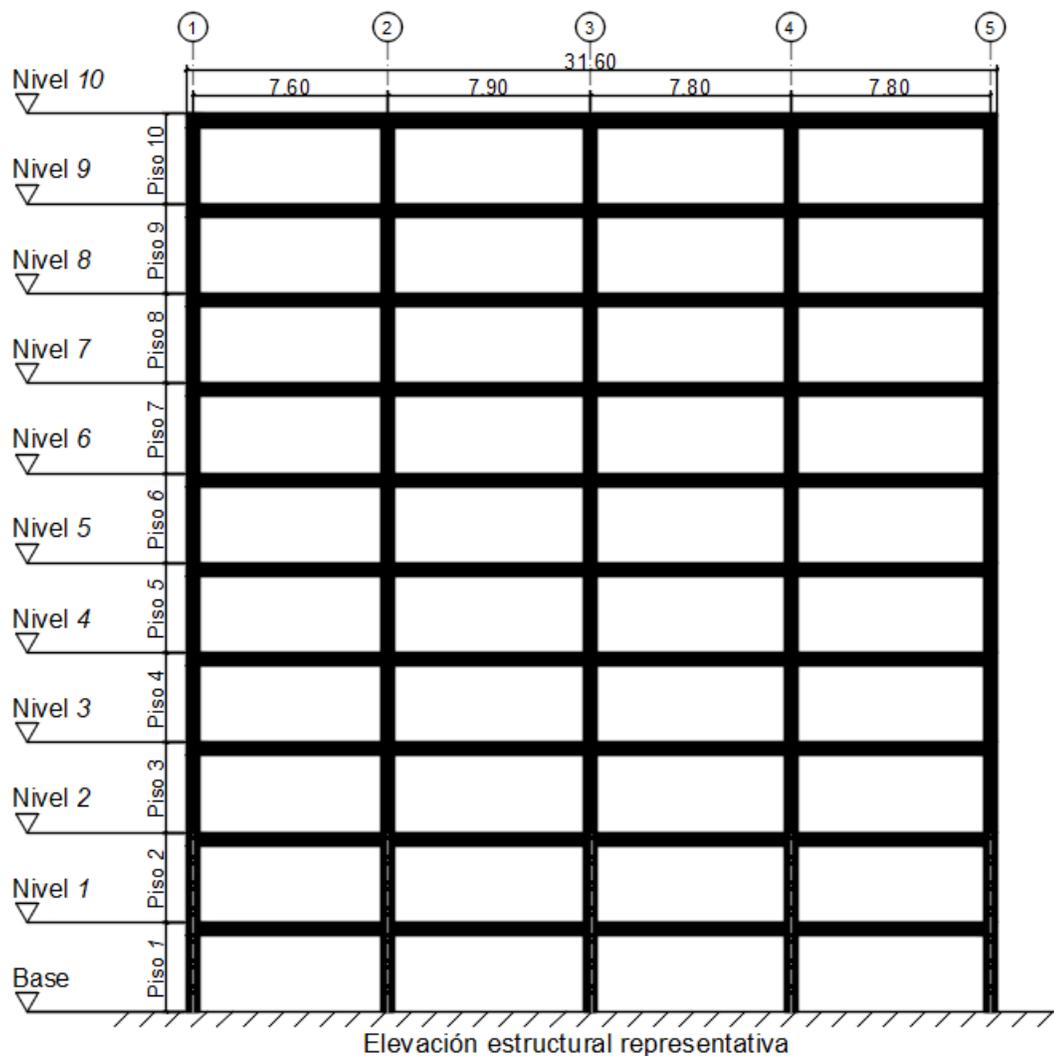


Figura 6. Elevación estructural representativa de la estructura analizada. (Vides. V. F., 2023).



Figura 7. Planta arquitectónica de piso típico de la estructura analizada. (Vides. V. F., 2023).

Con el fin de realizar el análisis de la influencia del mejoramiento del perfil sísmico del suelo en el diseño de pórticos de concreto reforzado, se realiza el análisis de dos escenarios, uno utilizando la modelación de una estructura descrita anteriormente, mediante softwares estructurales, apoyado sobre el suelo con las condiciones iniciales, compuesto por características físicas y mecánicas desfavorables, correspondiente a un perfil sísmico tipo E, denominado “Caso de Estudio 1”. El segundo escenario, denominado “Caso de Estudio 2”, considera la modelación de la misma estructura, pero recreando el suelo con el perfil sísmico mejorado, correspondiente a un perfil sísmico tipo D.

Para la selección del perfil del suelo a utilizar en el caso de estudio 1, se contó con el apoyo de un ingeniero especialista en geotecnia, el cual evalúa técnicamente que, con el método de remplazo total o parcial de suelos natural por rellenos granulares compactados, se puede cambiar los tipos de perfiles sísmicos del suelo. Así, con base en la información proporcionada por el profesional mencionado, se toma como ejemplo suelos del municipio de la Ceja, los cuales, en su superficie, tienden a tener características de baja resistencia, que resultan ser ideales para el presente estudio.

La estructura fue modelada utilizando un software de análisis y diseño estructural, apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo E, Caso de Estudio 1”, y en un suelo con perfil sísmico tipo D, Caso de Estudio 2”. En los análisis, para cada perfil sísmico, se elabora el respectivo espectro elástico de aceleraciones de diseño, y se determinan y las fuerzas sísmicas aplicadas a la estructura.

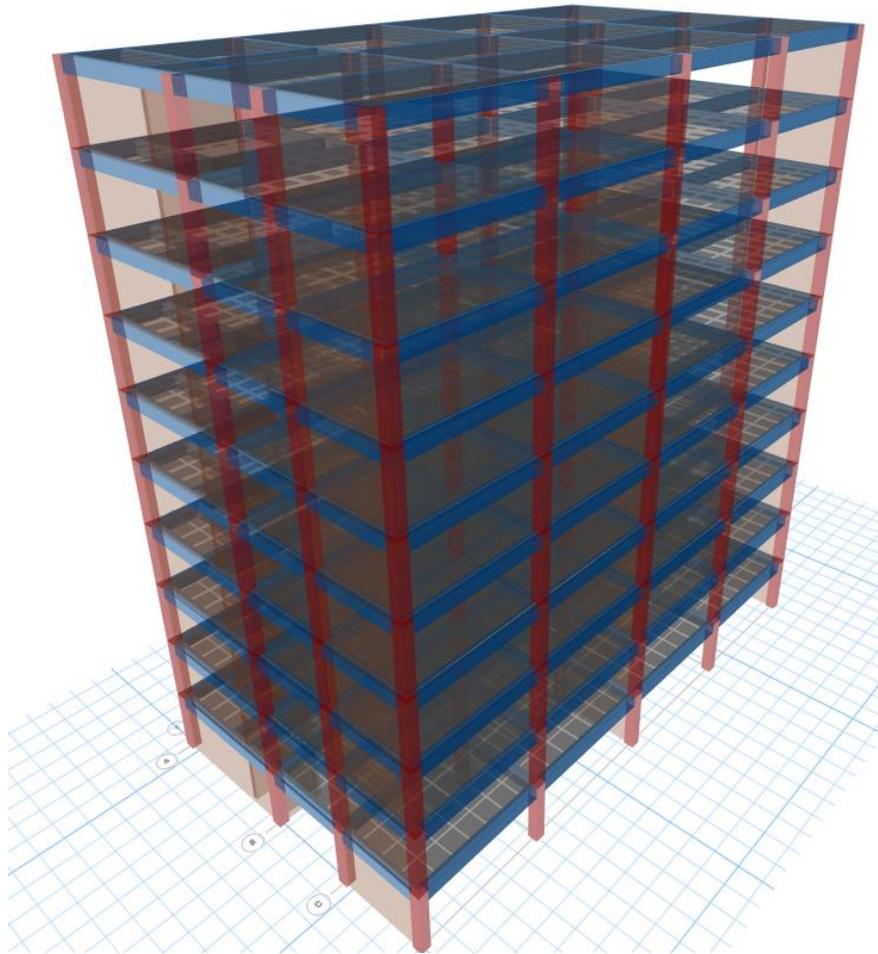


Figura 8. Modelo estructural caso estudio-Edificación 10 niveles.

Para cada caso de estudio se ingresa al modelo los respectivos parámetros sísmicos según la tipología, y se corren ambos modelos comparando así resultados y se analiza en detalle si el cambio en la cuantía de refuerzo y en las secciones del concreto llegan a compensar las excavaciones y reemplazos planteadas para la modificación del suelo; de igual forma se tendrá en cuenta que al mejorar las condiciones del suelo las fundaciones ya trabajan sobre suelos mejorados, lo que permite disminuir secciones y refuerzo de las mismas.

Todo lo anterior es evaluado y al final se concluye la viabilidad con respecto al factor económico con respecto al reemplazo de suelos para el mejoramiento de los perfiles sísmicos de los mismos.

5.2.Caso de Estudio 1

El presente caso de estudio corresponde a la modelación de la estructura anteriormente mencionada, apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo E,

5.2.1. Perfil sísmico E – Estudio Geotécnico

Para el presente caso de estudio se trabaja con la suposición de que se cuenta con un suelo cuyas características físicas y mecánicas cumplen con un perfil sísmico tipo E.

5.2.2. Espectro elástico de aceleraciones de diseño – Perfil sísmico E

Inicialmente, se determina el respectivo espectro de aceleraciones de diseño según lo estipulado en la normativa sismorresistente vigente en Colombia, NSR-10, para el municipio de la Ceja, el cual se encuentra localizado en una zona de amenaza sísmica intermedia. Así, se determinan los valores correspondientes al coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva (A_a), el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva (A_v) y los respectivos coeficientes de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio, adimensional (F_a), y el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio, adimensional (F_v). Estos coeficientes son mostrados en la Tabla 2.

Posteriormente, se determina el coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño (R), con los respectivos coeficientes de irregularidad en planta, en altura y por ausencia de redundancia según las condiciones con las que se cuenta en la arquitectura de la estructura. Adicionalmente se cuenta con un coeficiente de importancia igual a 1.0.

Finalmente, se obtiene el Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño a emplear en la modelación de la estructura, apoyada sobre un suelo con perfil sísmico tipo E (ver figura 9 y 10).

Municipio	Código	Aa	Av	Zona de Amenaza Sísmica	Ae	Ad
LA CEJA		0.15	0.2	Intermedia	0.13	0.07

Tipo suelo: Dado por el estudio de suelos, para nuestro caso suelo tipo E

COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	
Sistema estructural:	PORTICOS EN CONCRETO
Capacidad de disipar energía:	DMO
Valor R_o :	5.00
Irregularidad en planta ϕ_p :	1.00
Irregularidad en altura ϕ_a :	1.00
Irregularidad por ausencia de redundancia ϕ_r :	1.00
Valor para ser empleado en el diseño R:	5.00

R: $\phi_a \times \phi_p \times \phi_r \times R_o$

Coefficiente Importancia	1
Fa	2.1
Fv	3.2

Tabla 2. Coeficientes sísmicos para determinar el espectro de diseño - Perfil sísmico E.

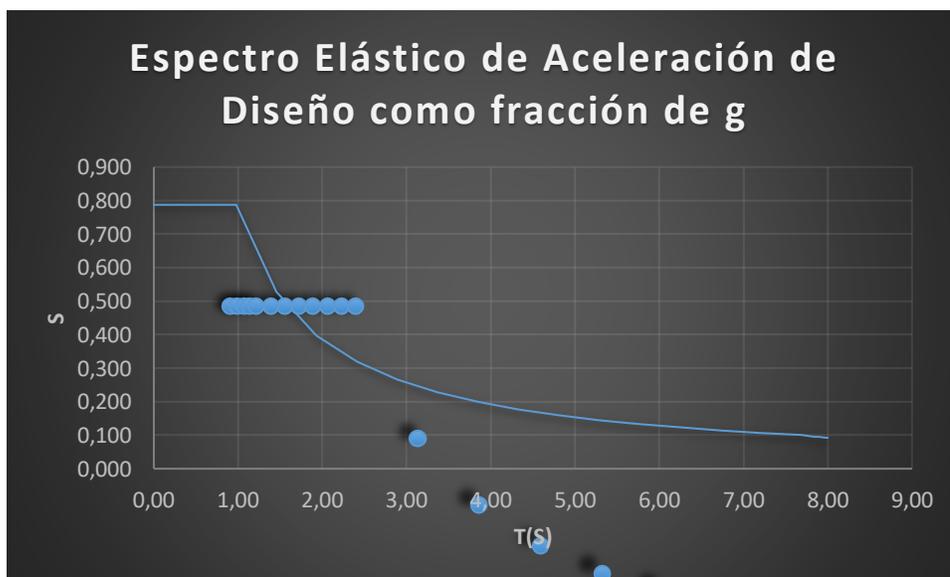


Figura 9. Espectro Elástico de Aceleración de Diseño como fracción de g para perfil sísmico E. (Elaboración Propia).

5.2.3. Modelo Estructural

Con ayuda del software de diseño ETABS se procede a realizar el modelo y el respectivo análisis, el cual es una herramienta innovadora y revolucionaria para análisis estructural y dimensionamiento de edificios, donde se consideró las siguientes condiciones:

- Sección de vigas de 0.7m x 0.9m de 28 MPa.
- Sección de Columna de 0.8m x 1.0m de 35 MPa.
- Se considero un factor de fisuración de (0.50) para vigas y columnas.
- Ajuste y/o corrección del cortante basal dinámico al cortante basal estático de referencia (fuerza horizontal equivalente).
- Se utilizó un factor de longitud rígida de nudos (uniones viga-columna) de 0.60.
- Se utilizó la siguiente carga muerta (adicional al peso propio de vigas y columnas):
 - Losas típicas:
 - Peso propio de losa: 2.74 kN/m². Esta carga es para una losa aligerada en dos direcciones de 0.40 m de alto (loseta de 50 mm, nervios de 100 mm de ancho y separación centro a centro de nervios de 1.10 m).
 - Acabados: 1.60 kN/m².
 - Particiones y fachadas: 3.00 kN/m².
 - Cielos falsos y redes: 0.20 kN/m².
 - En total, para las losas típicas, se tiene una carga de 7.54 kN/m².
 - Cubierta:
 - Peso propio de losa: 2.74 kN/m².
 - Acabados: 1.20 kN/m². Esto tiene en cuenta morteros de nivelación de, en promedio, 50 mm de espesor, más mantos impermeabilizantes.
 - Cielos falsos y redes: 0.20 kN/m²
 - En total, para la losa de cubierta se tiene una carga de 4.14 kN/m².
 - La carga viva en la cubierta de 1.80 kN/m².

- Concreto 28 MPa

Figura 10. Material de 28 MPa para caso de estudio 1- Etabs.

Figura 11. Propiedades del material de 28 MPa para caso de estudio 1 - Etabs.

- Concreto 35 MPa

Figura 12. Material de 35 MPa para caso de estudio 1 - Etabs.

Figura 13. Propiedades del material de 35 MPa para caso de estudio 1 - Etabs.

- Secciones Columnas-Fisuradas

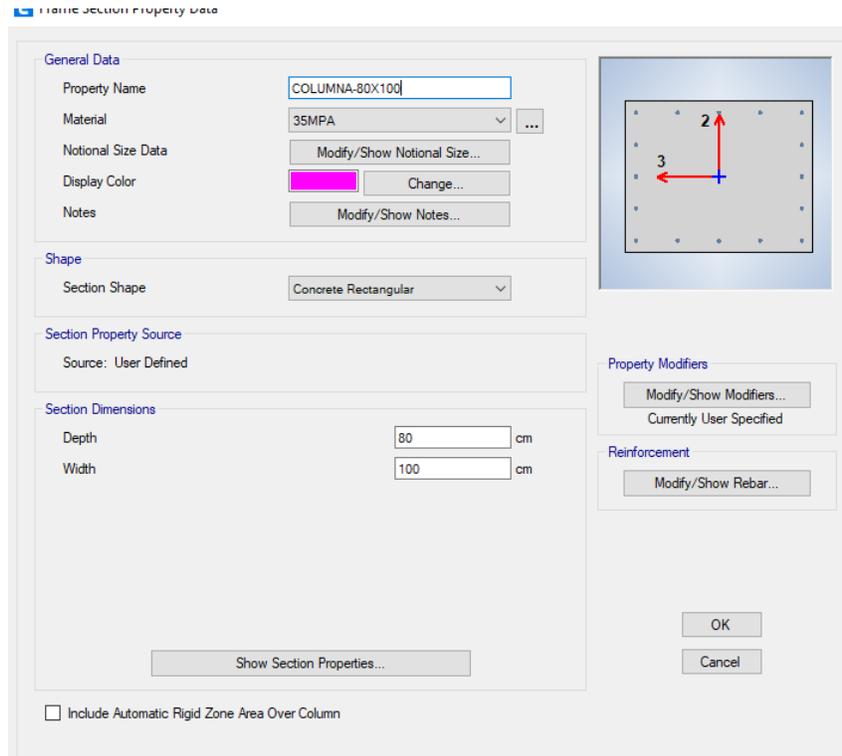


Figura 14. Secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.

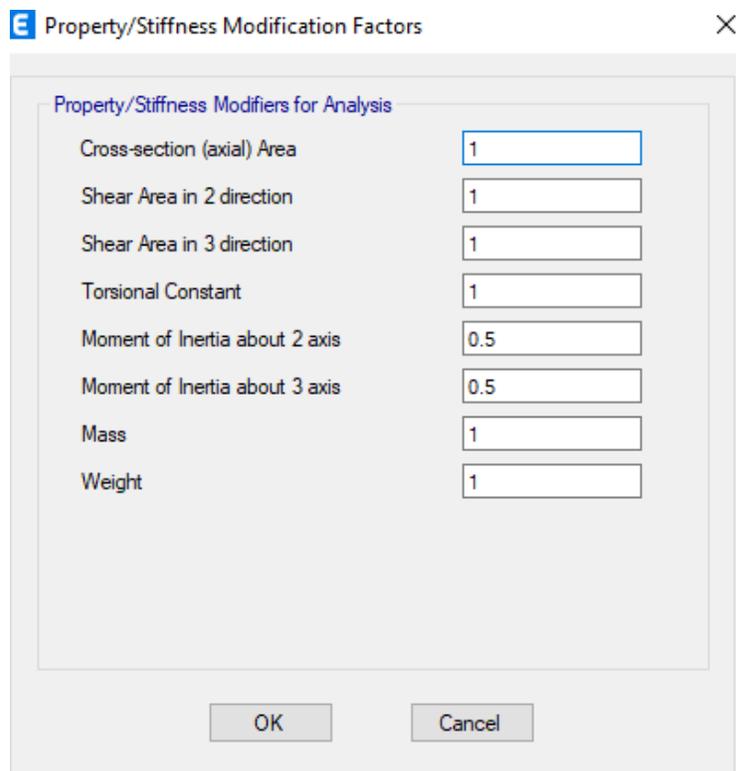


Figura 15. Propiedades secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.

- Secciones Vigas-Fisuradas

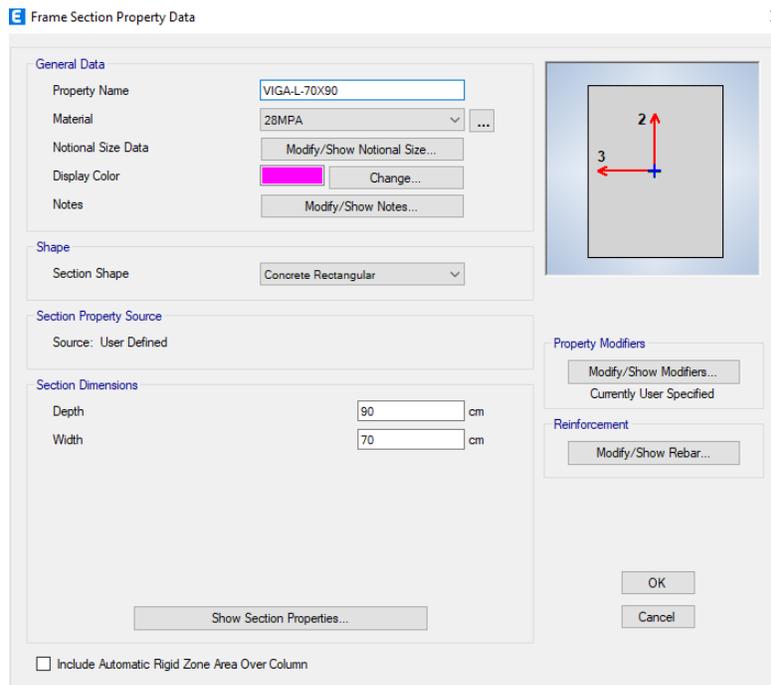


Figura 16. Secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.

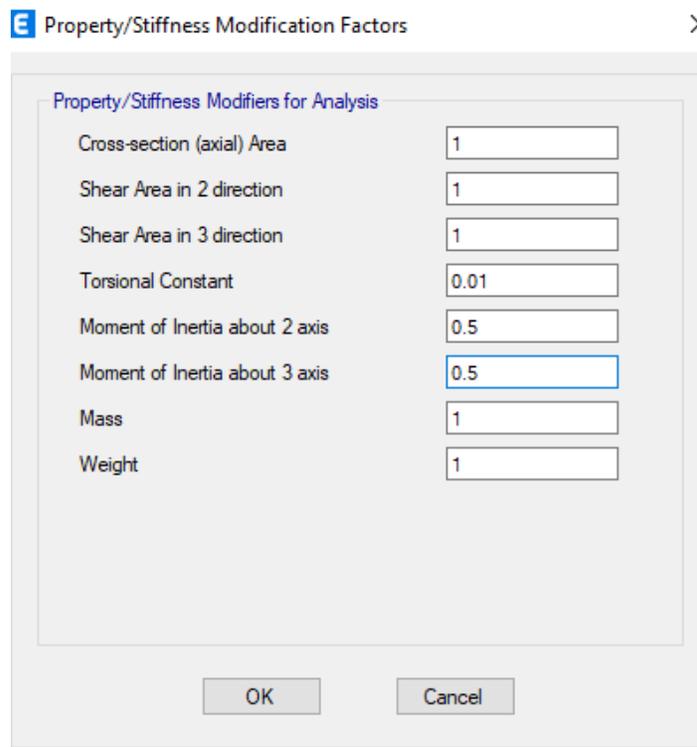


Figura 17. Propiedades secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 1 - Etabs.

- **Planta Columnas**

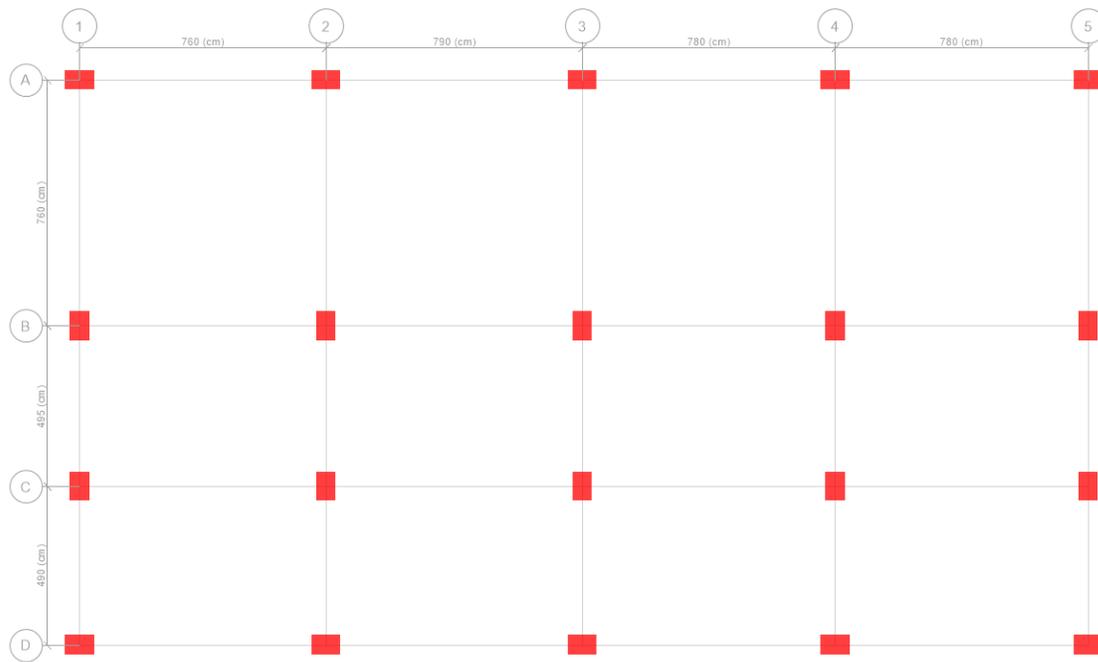


Figura 18. Vista en planta de columnas para el caso de estudio 1 - Etabs

- **Planta Vigas**

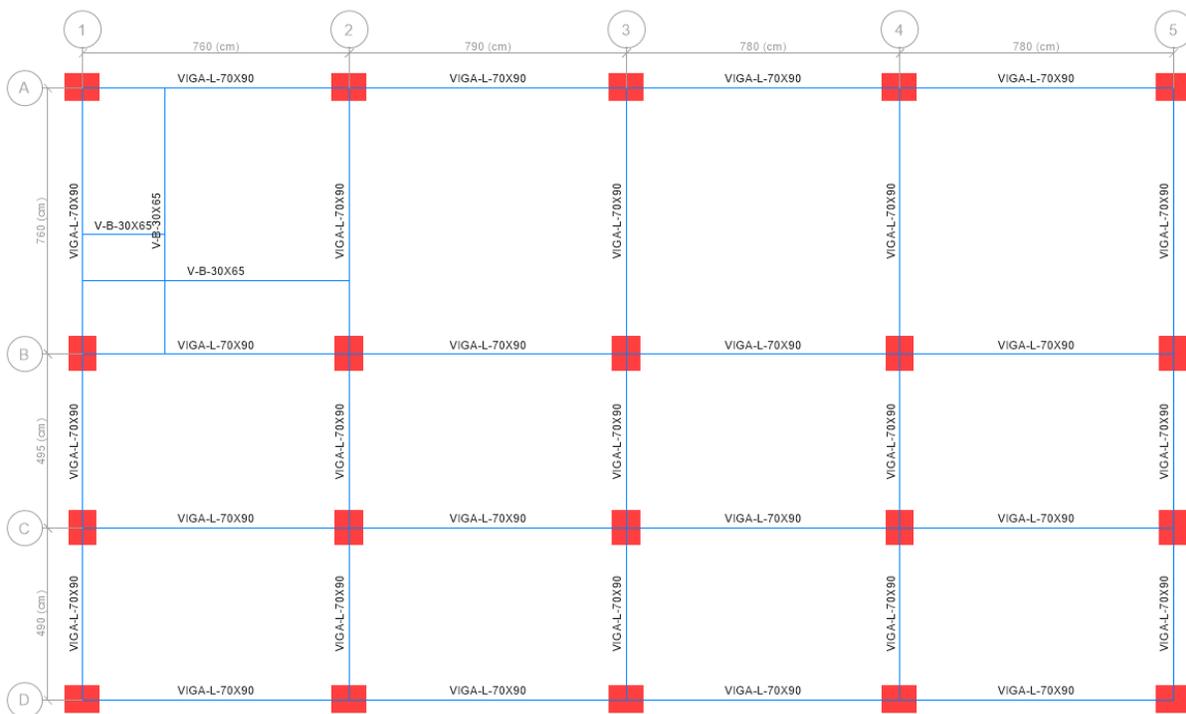


Figura 19. Vista en planta de vigas para el caso de estudio 1 - Etabs

- **Análisis Cargas**

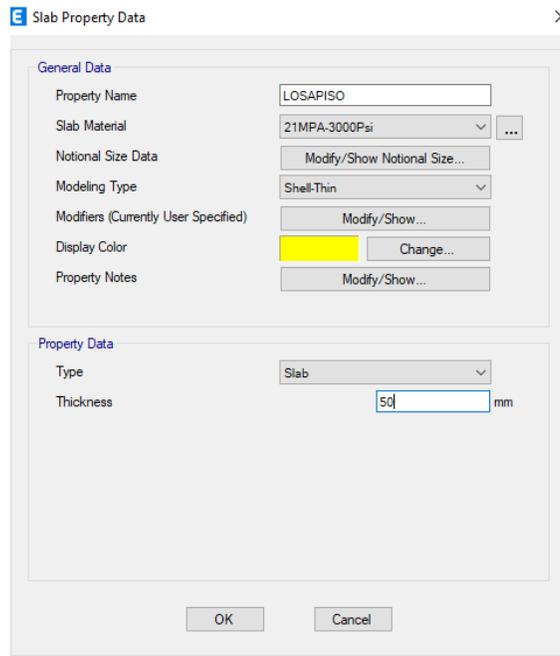


Figura 20. Propiedades de losa para el caso de estudio 1 - Etabs

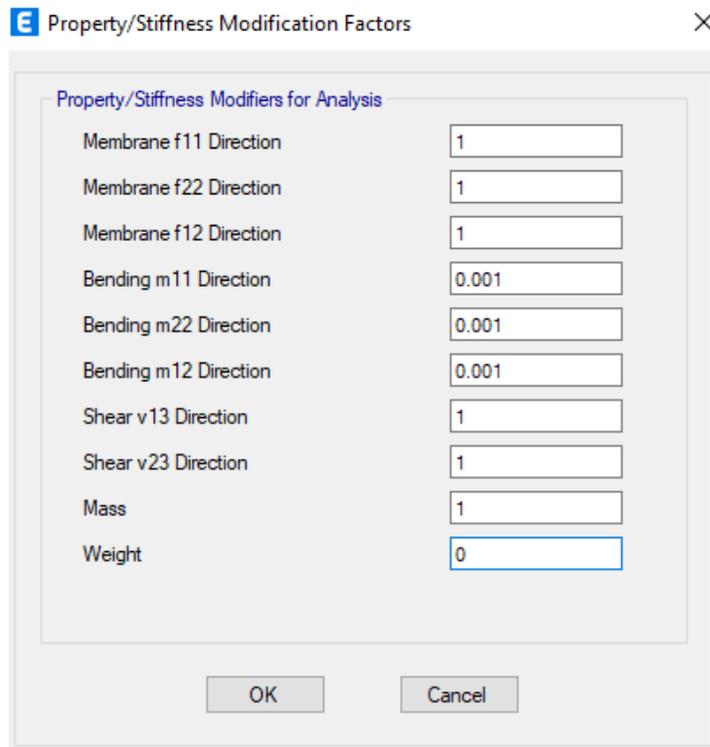


Figura 21. Factor de modificación de rigidez para el caso de estudio 1 – Etabs

- Cargas Vivas (kN/m^2)

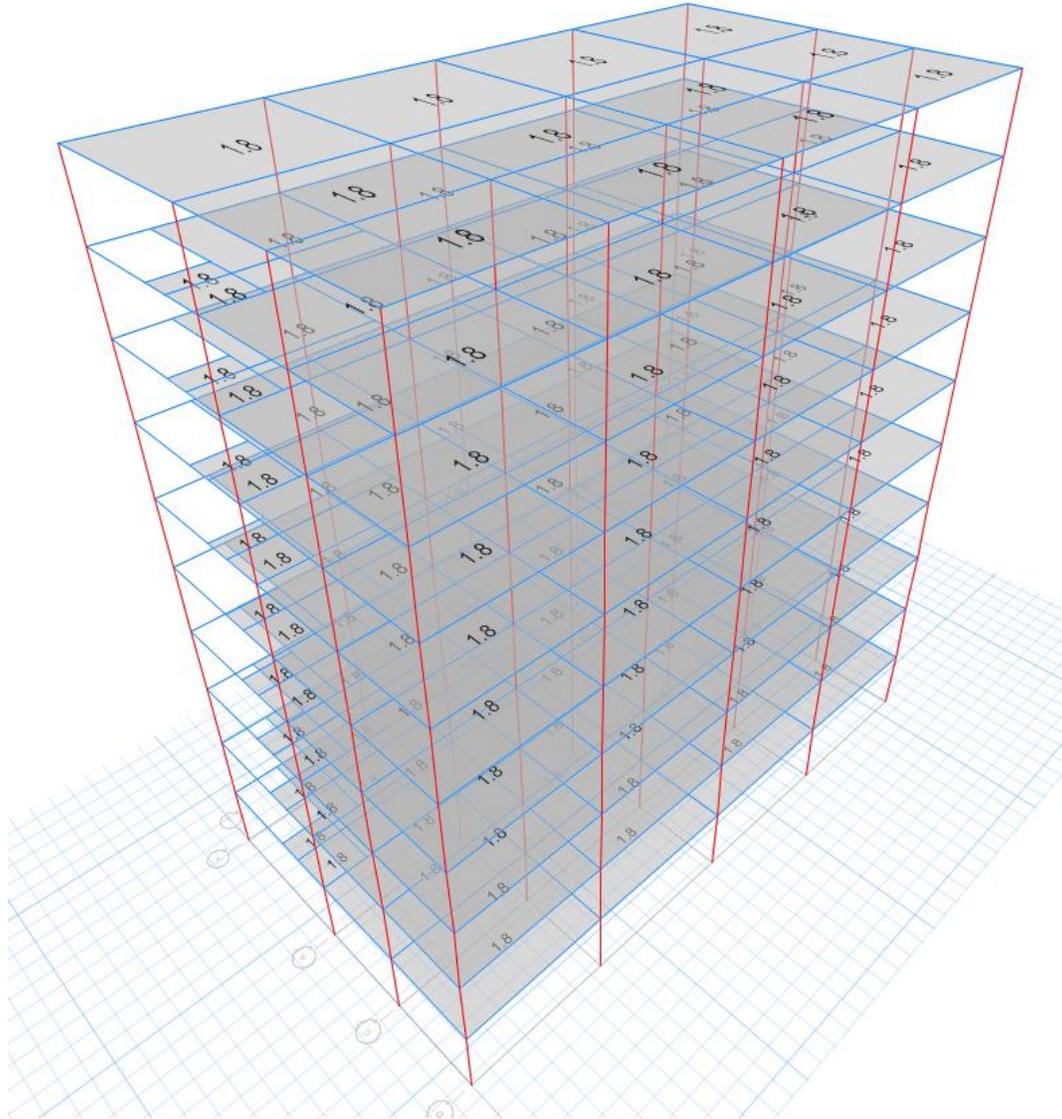


Figura 22. Cargas vivas para el caso de estudio 1 – Etabs

- Cargas Vivas (Escaleras) (kN/m)

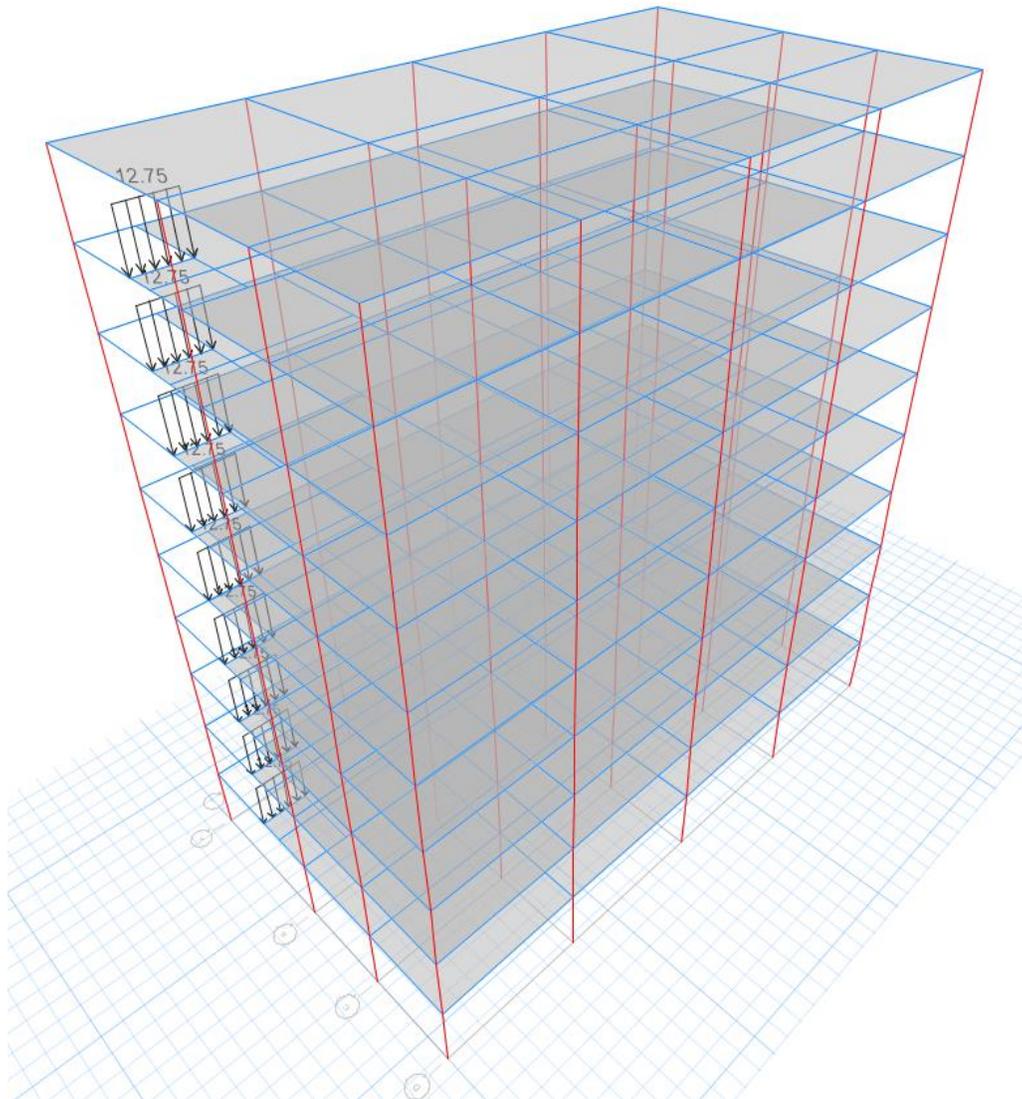


Figura 23. Cargas vivas en escaleras para el caso de estudio 1 – Etabs

- Cargas Muertas (kN/m²)

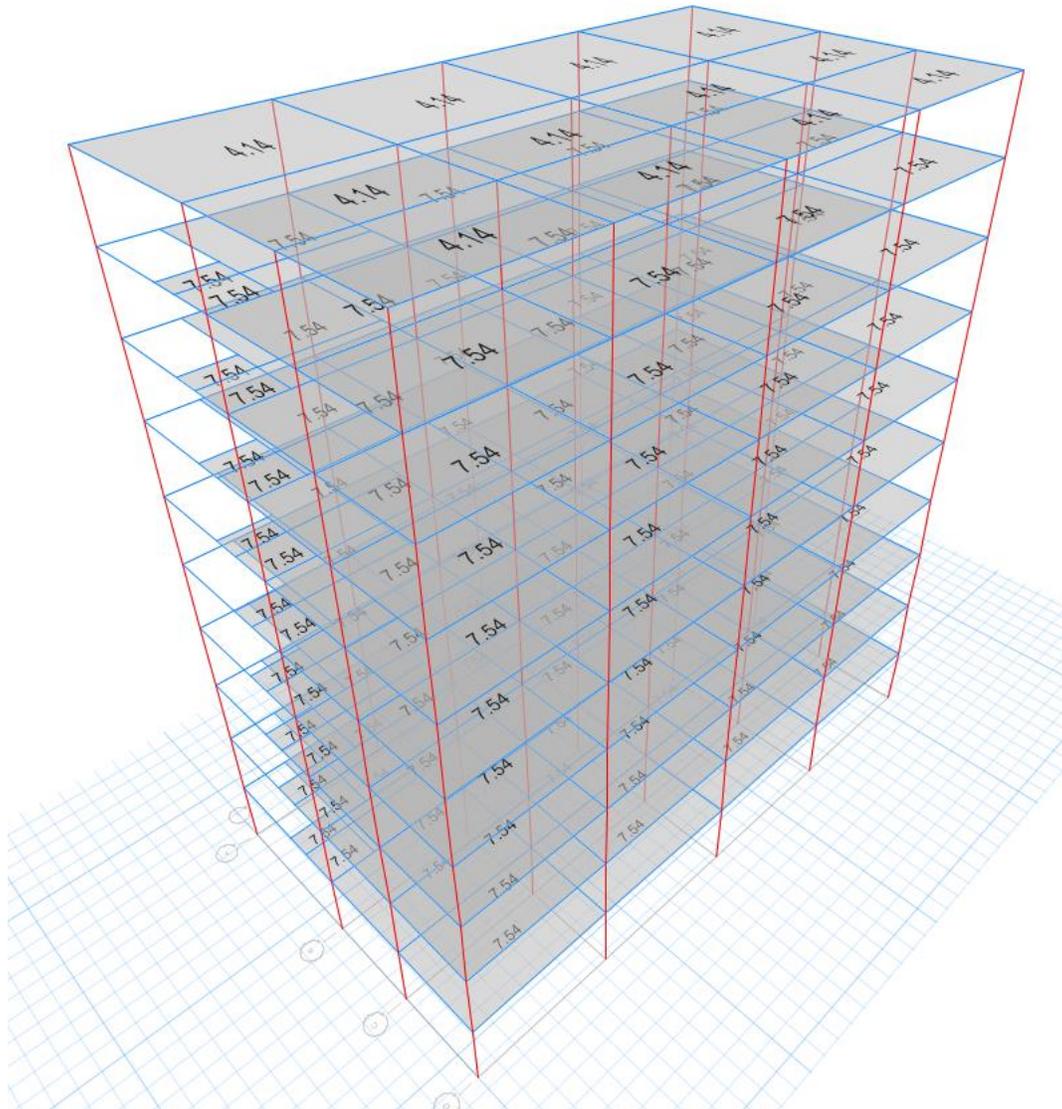


Figura 24. Cargas muertas para el caso de estudio 1 – Etabs

- Cargas Muertas (Escaleras) (kN/m)

PESO ESCALERA-MONOGRAFÍA U DE A			
		GEOMETRIA DE LA LOSA	
		$l1 = 4.25$ m $H = 1.75$ m $c = 16$ cm	$f_y = 420$ MPa $f'c = 21$ MPa $h = 30$ cm
		$e1 = l/20 (0.4 + f_y/700) = 213$ mm	
		Espesor escogido = 15 cm	
		Pendiente $a = h/l1 = 22.38^\circ$	
CARGAS			
	Peso propio de la losa =	3.89	kN/m ²
	Peso propio de peldaños =	1.92	kN/m ²
	Acabado peldaños =	1.35	kN/m ²
	Afinado Inferior =	0.48	kN/m ²
	Carga Muerta Total =	7.64	kN/m ²

Figura 25. Cálculo de cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 1 – Etabs

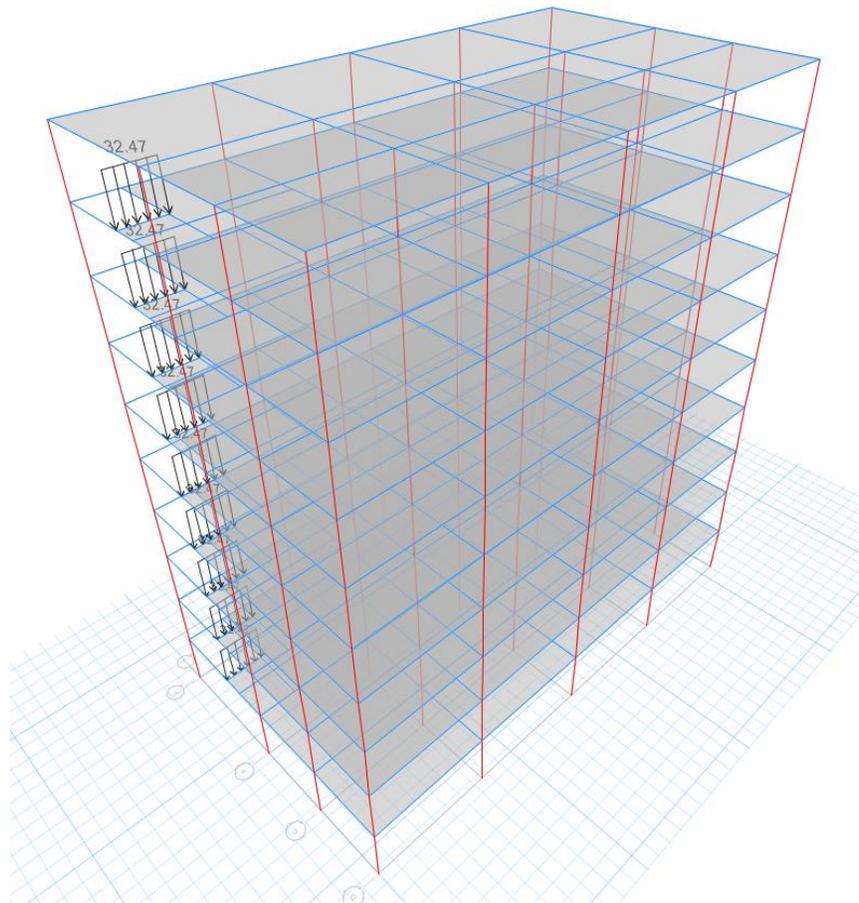


Figura 26. Cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 1 – Etabs

- Factor de Longitud Rígida de Nudos

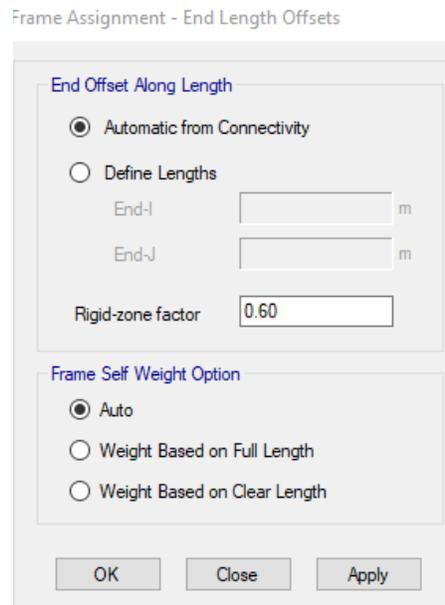


Figura 27. Factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 1 – Etabs

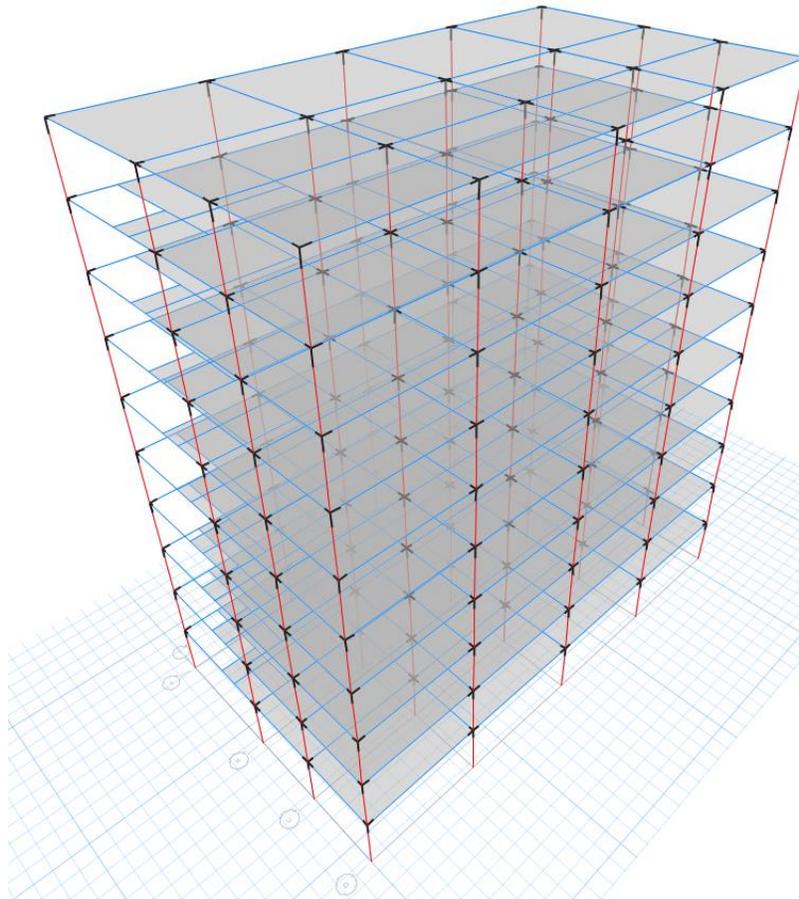


Figura 28. Vista en 3D factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 1 – Etabs

- Masa Sísmica

Mass Source Data

Mass Source Name: MsSrc1

Mass Source

Element Self Mass

Additional Mass

Specified Load Patterns

Adjust Diaphragm Lateral Mass to Move Mass Centroid by:

This Ratio of Diaphragm Width in X Direction:

This Ratio of Diaphragm Width in Y Direction:

Mass Multipliers for Load Patterns

Load Pattern	Multiplier
Carga Adicional	1
Dead	1
Carga Adicional	1

Buttons: Add, Modify, Delete

Mass Options

Include Lateral Mass

Include Vertical Mass

Lump Lateral Mass at Story Levels

Buttons: OK, Cancel

Figura 29. Masa sísmica para el caso de estudio 1 – Etabs

5.2.4. Resultados

- Sección de vigas de 0.7m x 0.9m de 28 MPa.
- Sección de Columna de 0.8m x 1.0m de 35 MPa.

- Chequeo Derivas Finales Secciones Fisuradas

- Derivas Eje Y

Deriva Y (sin multiplicar por 0.7): 1.01 %

Deriva Y (multiplicada por 0.70): 0.707% (Cumple)

- Derivas Eje X

Deriva X (sin multiplicar por 0.7): 1.21 %

Deriva X (multiplicada por 0.70): 0.85% (Cumple)

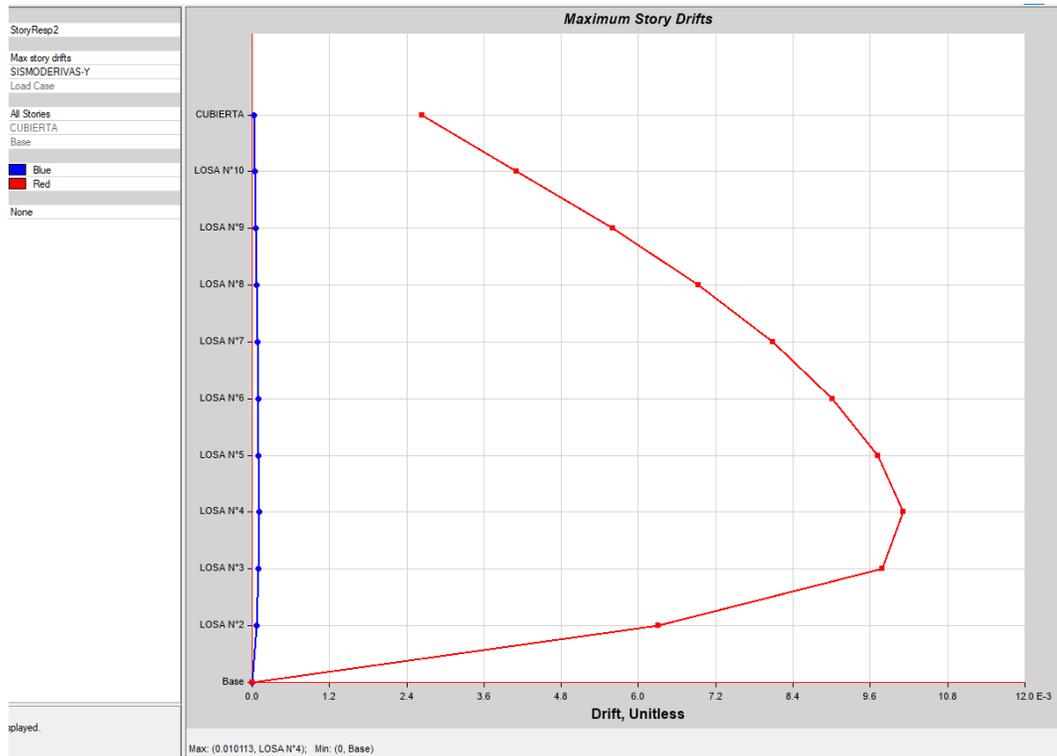


Figura 30. Derivas Eje Y para el caso de estudio 1 – Etabs

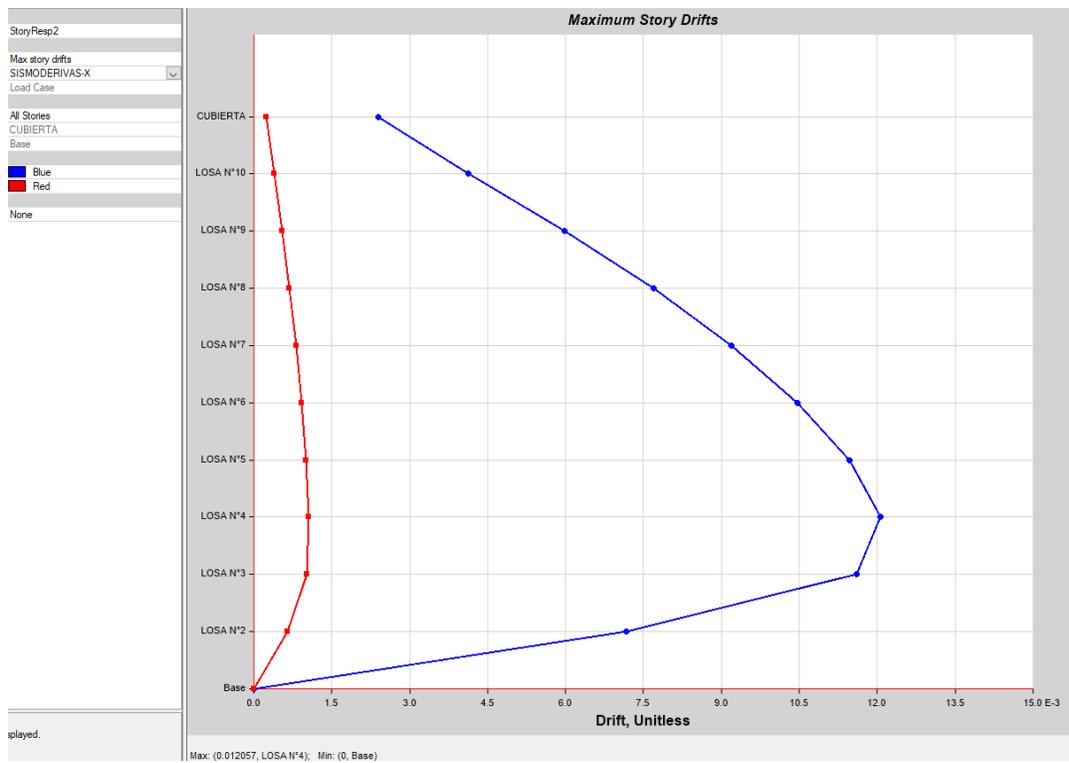


Figura 31. Derivas Eje X para el caso de estudio 1 – Etabs

- **Participación Masa**

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
Case	Mode	Period [s]	UX	UY	SumUX	SumUY
Modal	1	1.099	0.806	0.000	0.806	0.000
Modal	2	0.993	0.000	0.805	0.806	0.805
Modal	3	0.865	0.003	0.000	0.809	0.805
Modal	4	0.353	0.098	0.000	0.907	0.805
Modal	5	0.319	0.000	0.107	0.907	0.911
Modal	6	0.279	0.000	0.000	0.907	0.911
Modal	7	0.199	0.038	0.000	0.945	0.911
Modal	8	0.179	0.000	0.037	0.945	0.948
Modal	9	0.159	0.000	0.000	0.945	0.948
Modal	10	0.133	0.021	0.000	0.966	0.948
Modal	11	0.121	0.000	0.020	0.966	0.968
Modal	12	0.107	0.000	0.000	0.966	0.968

Tabla 3. Participación de Masa para el caso de estudio 1

- **Chequeo Cortante Basal**

Para este caso no requiere ajuste tanto en eje X como en eje Y

5.2.5. Presupuesto

En este aparte se da a conocer el presupuesto de las actividades de obra más relevantes para el objetivo de la presente monografía, donde para el primer caso de estudio se calcula el costo directo de construcción de los elementos estructurales, como son la cimentación, columnas y vigas. Por lo tanto, se procede con el cálculo de cantidades de obras y valor del precio unitario de las siguientes actividades de obra:

- Excavación mecánica de material heterogéneo DE 4-6 m, bajo cualquier grado de humedad.
- llenos material seleccionado, compactados mecánicamente hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.
- Suministro, transporte e instalación de acero de refuerzo figurado $f_y = 420$ MPa (60000 psi), corrugado (Unidad en kg).

- Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 MPa, Compra de mezcla (unidad en m³).
- Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 MPa, Compra de mezcla (unidad en m³).

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA			
PRESUPUESTO GENERAL-SUELO TIPO E					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	EXCAVACIÓN MECÁNICA de material heterogéneo de 6 m en adelante, bajo cualquier grado de humedad.	m3	615,76	\$ 57.117,00	\$ 35.170.363,92
2	LLENOS MATERIAL SELECCIONADO, compactados mecánicamente hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.	m3	0,00	\$ 79.359,00	\$ 0,00
3	Suministro, transporte e instalación de ACERO DE REFUERZO FIGURADO FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado.	kg	84492,46	\$ 5.961,00	\$ 503.659.554,06
4	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 Mpa (Compra de mezcla)	m3	1175,76	\$ 898.438,00	\$ 1.056.347.462,88
5	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 Mpa (Compra de mezcla)	m3	1195,43	\$ 754.877,00	\$ 902.402.612,11
COSTO TOTAL					\$ 2.497.579.993,00
ÁREA CONSTRUIDA					5.672,20
VALOR m² DE LA SUPERESTRUCTURA					\$ 440.319,45

Tabla 4. Presupuesto de superestructura del caso de estudio 1.

El presupuesto de la construcción de la superestructura apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo E, se calculó luego de realizar la modelación, el análisis de la estructura y chequeo de cumplimiento de parámetros normativos como desplazamientos, solicitaciones y derivas. Dicho presupuesto se determinó a partir del cálculo y recopilación de cantidades de obra, precios y rendimiento de materiales, equipos y mano de obra y análisis de precios unitarios. Cabe resaltar que en el presente presupuesto no se tiene en cuenta el costo de los demás elementos estructurales y no estructurales.

En el capítulo de Anexos se especifica el listado de los materiales a utilizar en las respectivas actividades de obra mencionadas anteriormente, con su respectivo costo, en concordancia con los precios del mercado de la zona; de igual forma, en la parte de anexos se

muestra el valor de alquiler de los equipos, el precio de la mano de obra con su respectivo factor prestacional, de acuerdo con la respectiva normativa y Los análisis de precios unitarios (APU).

5.3.Caso de Estudio 2

El presente caso de estudio corresponde a la modelación de la estructura anteriormente mencionada, apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo D, al cual se le realizó un proceso de mejoramiento del suelo utilizando el método de sustitución de suelos natural por rellenos granulares compactados.

5.3.1. Perfil sísmico D – Estudio Geotécnico

Se contó con el apoyo de un ingeniero especialista en geotecnia, el cual evalúa técnicamente que, con el método de remplazo total o parcial de suelos natural por rellenos granulares compactados, se puede cambiar los tipos de perfiles sísmicos del suelo. Así, con base en la información proporcionada por el profesional mencionado, se toma como ejemplo suelos del municipio de la Ceja, los cuales, en su superficie, tienden a tener características de baja resistencia, que resultan ser ideales para el presente estudio, el cual recomendó la construcción de un lleno estructural con una compactación del 98% y una profundidad de 10 m, permitiendo reducir la relación de vacíos y acostumar al suelo a una carga específica. Adicionalmente, basados en las relaciones gravimétricas y teniendo en cuenta que la relación de vacíos depende de la humedad del material, se tiene que esta última disminuye a medida que se genere compactación mejorando de esta manera la capacidad admisible del suelo y permitiendo trabajar con un perfil tipo D.

5.3.2. Espectro elástico de aceleraciones de diseño – Perfil sísmico D

De igual forma que en el caso de estudio 1, se determina el respectivo espectro de aceleraciones de diseño según lo estipulado en la normativa sismorresistente vigente en Colombia, NSR-10, para el municipio de la Ceja, el cual se encuentra localizado en una zona de amenaza sísmica intermedia. Así, se determinan los valores correspondientes al coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva (A_a), el coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva (A_v) y los respectivos coeficientes de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio, adimensional (F_a), y el coeficiente de

amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios, debida a los efectos de sitio, adimensional (Fv). Estos coeficientes son mostrados en la Tabla 23.

Posteriormente, se determina el coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño (R), con los respectivos coeficientes de irregularidad en planta, en altura y por ausencia de redundancia según las condiciones con las que se cuenta en la arquitectura de la estructura. Adicionalmente se cuenta con un coeficiente de importancia igual a 1.0.

Finalmente, se obtiene el Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño a emplear en la modelación de la estructura, apoyada sobre un suelo con perfil sísmico tipo D (ver figura 11 y 12).

Municipio	Codigo	Aa	Av	Zona de Amenaza Sísmica	Ae	Ad
LA CEJA		0.15	0.2	Intermedia	0.13	0.07

Tipo suelo: Dado por el estudio de suelos, para nuestro caso suelo tipo D

COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	
Sistema estructural:	PORTICOS EN CONCRETO
Capacidad de disipar energía:	DMO
Valor R_o :	5.00
Irregularidad en planta ϕ_p :	1.00
Irregularidad en altura ϕ_a :	1.00
Irregularidad por ausencia de redundancia ϕ_r :	1.00
Valor para ser empleado en el diseño R:	5.00

R: $\phi_a \times \phi_p \times \phi_r \times R_o$

Coeficiente Importancia	1
Fa	1.5
Fv	2

Tabla 5. Coeficientes sísmicos para determinar el espectro de diseño - Perfil sísmico D.

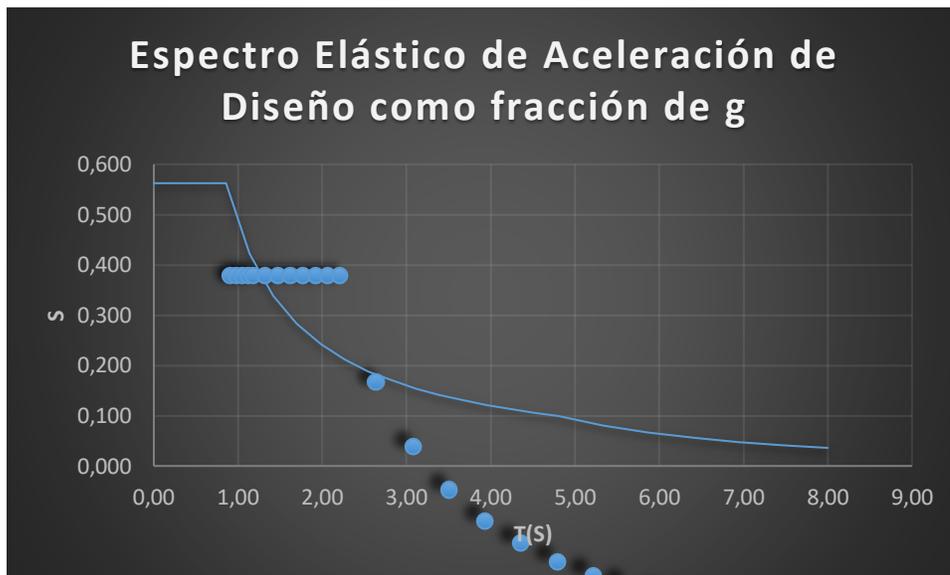


Figura 32. Espectro Elástico de Aceleración de Diseño como fracción de g para perfil sísmico D. (Elaboración Propia).

5.3.3. Modelo Estructural

Con ayuda del software de diseño ETABS se procede a realizar el modelo y el respectivo análisis, el cual es una herramienta innovadora y revolucionaria para análisis estructural y dimensionamiento de edificios, donde se consideró las siguientes condiciones:

- Sección de vigas de 0.5m x 0.7m de 28 MPa.
- Sección de Columna de 0.7m x 0.9m de 35 MPa.
- Se considero un factor de fisuración de (0.50) para vigas y columnas.
- Ajuste y/o corrección del cortante basal dinámico al cortante basal estático de referencia (fuerza horizontal equivalente).
- Se utilizó un factor de longitud rígida de nudos (uniones viga-columna) de 0.60.
- Se utilizó la siguiente carga muerta (adicional al peso propio de vigas y columnas):
 - Losas típicas:
 - Peso propio de losa: 2.74 kN/m². Esta carga es para una losa aligerada en dos direcciones de 0.40 m de alto (loseta de 50 mm, nervios de 100 mm de ancho y separación centro a centro de nervios de 1.10 m).
 - Acabados: 1.60 kN/m².
 - Particiones y fachadas: 3.00 kN/m².

- Cielos falsos y redes: 0.20 kN/m².
 - En total, para las losas típicas, se tiene una carga de 7.54 kN/m².
 - Cubierta:
 - Peso propio de losa: 2.74 kN/m².
 - Acabados: 1.20 kN/m². Esto tiene en cuenta morteros de nivelación de, en promedio, 50 mm de espesor, más mantos impermeabilizantes.
 - Cielos falsos y redes: 0.20 kN/m²
 - En total, para la losa de cubierta se tiene una carga de 4.14 kN/m².
 - La carga viva en la cubierta de 1.80 kN/m².
- **Concreto 28 MPa**

Material Property Data

General Data

Material Name: 28MPa

Material Type: Concrete

Directional Symmetry Type: Isotropic

Material Display Color: [Color Selection] Change...

Material Notes: [Text Area] Modify/Show Notes...

Material Weight and Mass

Specify Weight Density Specify Mass Density

Weight per Unit Volume: 23.5631 kN/m³

Mass per Unit Volume: 2.40277 kN-s³/m⁴

Mechanical Property Data

Modulus of Elasticity, E: 24870000 kN/m²

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000099 1/C

Shear Modulus, G: 10362500 kN/m²

Design Property Data

Modify/Show Material Property Design Data...

Advanced Material Property Data

Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties...

Modulus of Rupture for Cracked Deflections

Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)

User Specified

OK Cancel

Figura 33. Material de 28 MPa para caso de estudio 2- Etabs.

The dialog box 'Material Property Design Data' contains the following fields:

- Material Name and Type:**
 - Material Name: 28MPA
 - Material Type: Concrete, Isotropic
 - Grade: (empty)
- Design Properties for Concrete Materials:**
 - Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 28000 kN/m²
 - Lightweight Concrete
 - Shear Strength Reduction Factor: (empty)

Buttons: OK, Cancel

Figura 34. Propiedades del material de 28 MPa para caso de estudio 2 - Etabs.

- **Concreto 35 MPa**

The dialog box 'Material Property Data' contains the following sections and fields:

- General Data:**
 - Material Name: 35MPA
 - Material Type: Concrete
 - Directional Symmetry Type: Isotropic
 - Material Display Color: (Color swatch) Change...
 - Material Notes: (Text area) Modify/Show Notes...
- Material Weight and Mass:**
 - Specify Weight Density Specify Mass Density
 - Weight per Unit Volume: 23.5631 kN/m³
 - Mass per Unit Volume: 2.40277 kN-s³/m⁴
- Mechanical Property Data:**
 - Modulus of Elasticity, E: 27805570 kN/m²
 - Poisson's Ratio, U: 0.2
 - Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.000099 1/C
 - Shear Modulus, G: 11585654167 kN/m²
- Design Property Data:**
 - Modify/Show Material Property Design Data...
- Advanced Material Property Data:**
 - Nonlinear Material Data...
 - Material Damping Properties...
 - Time Dependent Properties...
- Modulus of Rupture for Cracked Deflections:**
 - Program Default (Based on Concrete Slab Design Code)
 - User Specified (empty)

Buttons: OK, Cancel

Figura 35. Material de 35 MPa para caso de estudio 2 - Etabs.

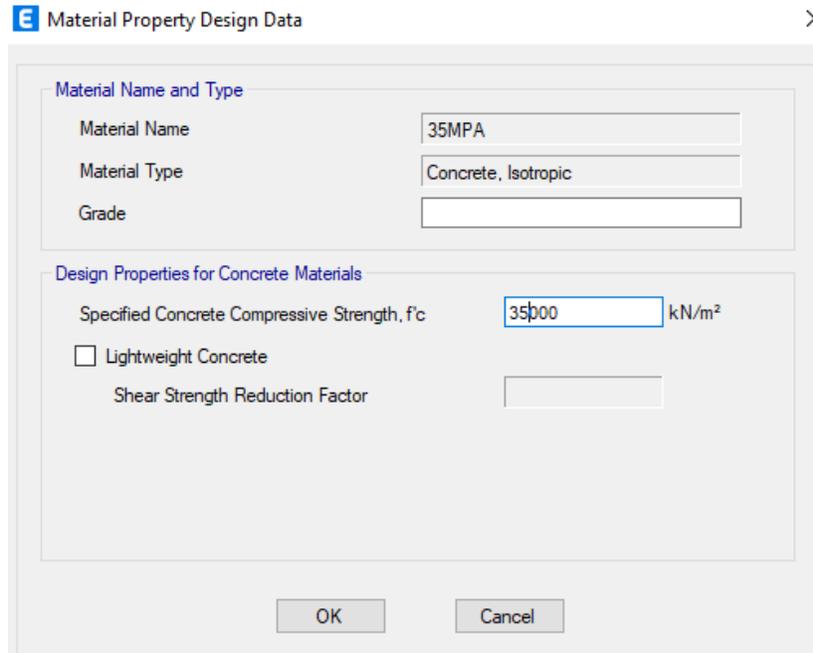


Figura 36. Propiedades del material de 35 MPa para caso de estudio 2 - Etabs.

- Secciones Columnas-Fisuradas

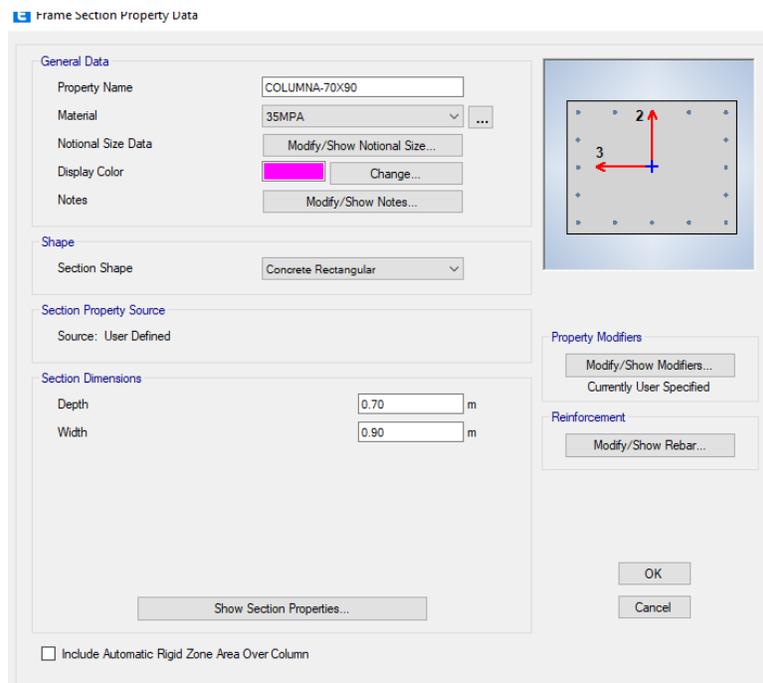


Figura 37. Secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 2 – Etabs

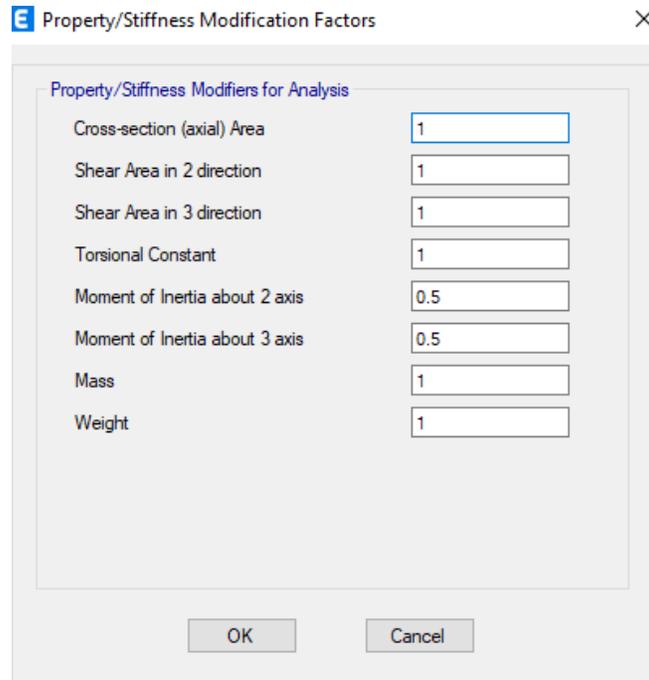


Figura 38. Propiedades secciones de columnas fisuradas para caso de estudio 2 - Etabs.

- Secciones Vigas-Fisuradas

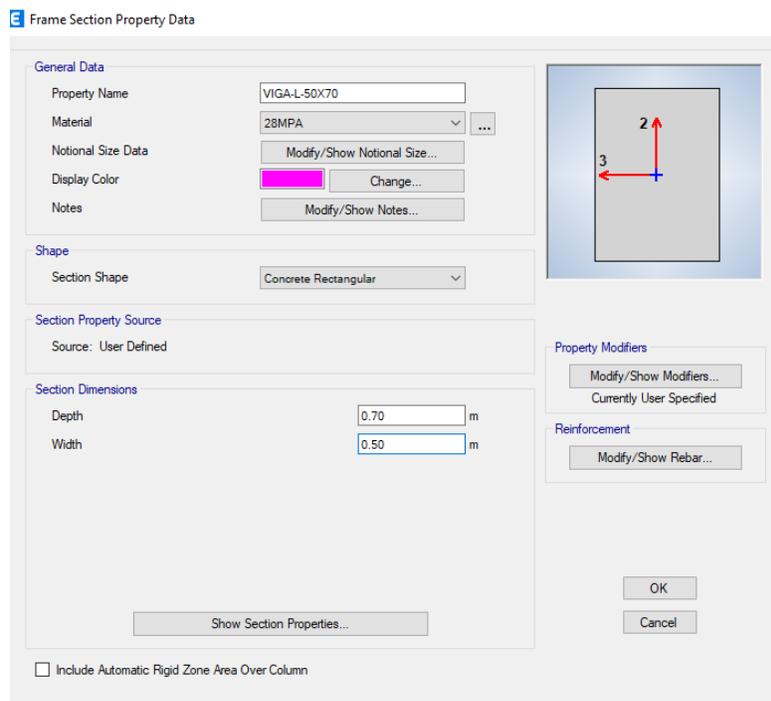


Figura 39. Secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 2 - Etabs.

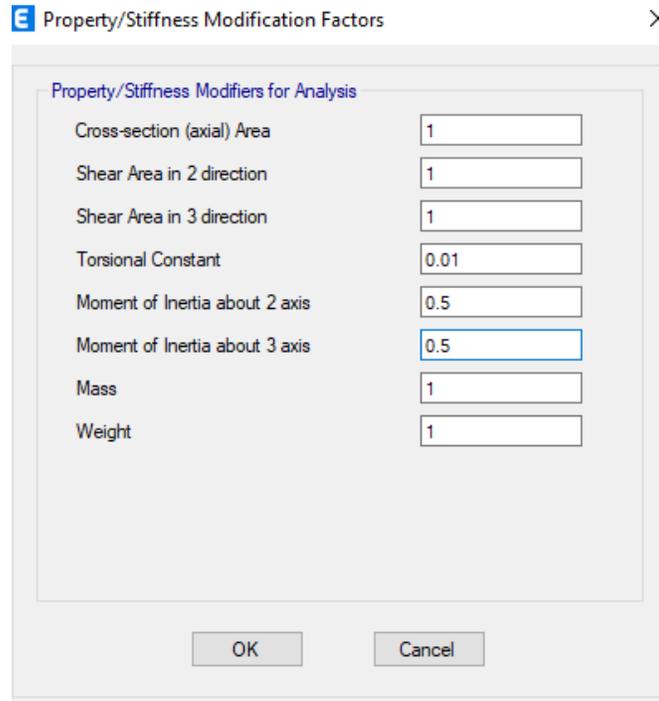


Figura 40. Propiedades secciones de vigas fisuradas para caso de estudio 2 - Etabs.

- Vista en Planta - Columnas

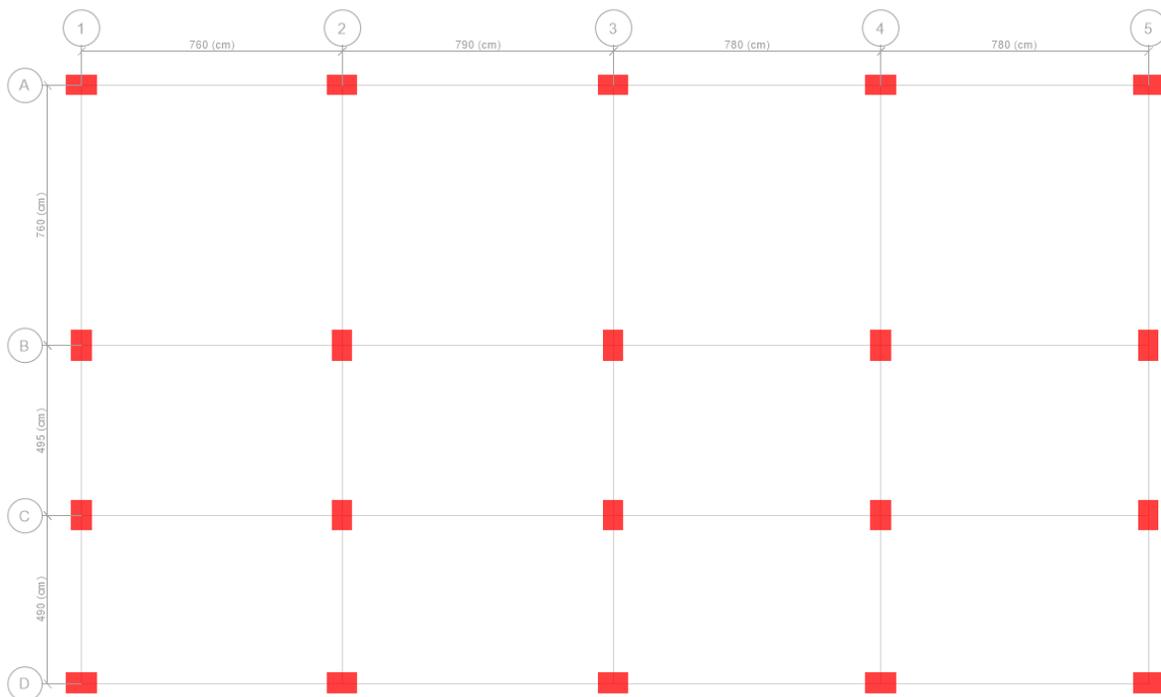


Figura 41. Vista en planta de columnas para el caso de estudio 2 – Etabs

- Vista en Planta Vigas

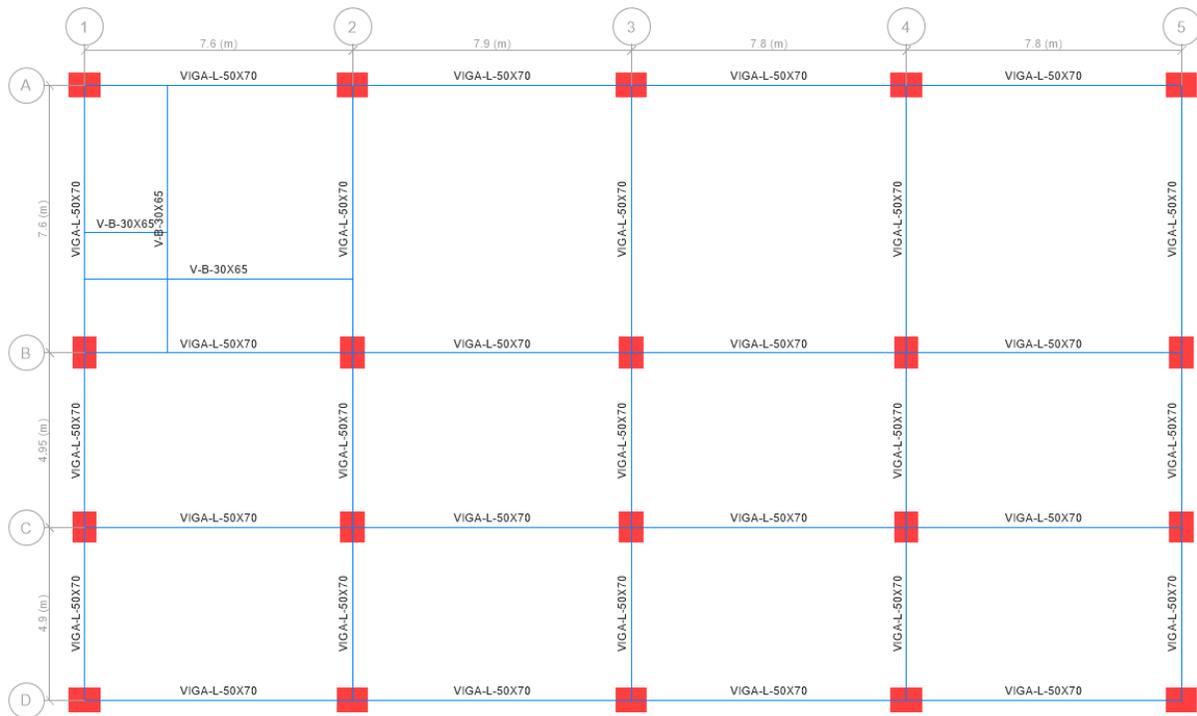


Figura 42. Vista en planta de vigas para el caso de estudio 2 - Etabs

- Análisis Cargas

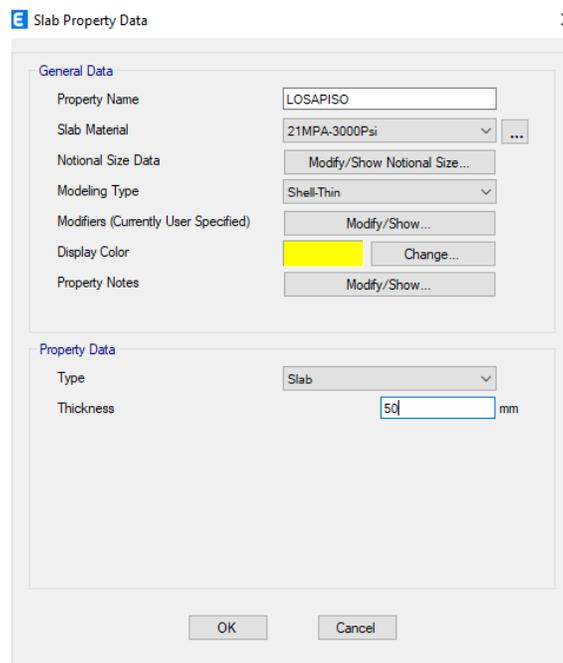


Figura 43. Propiedades de losa para el caso de estudio 2 - Etabs

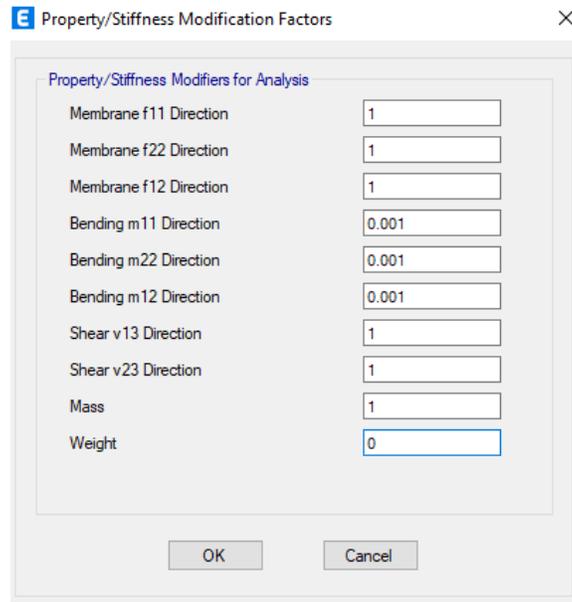


Figura 44. Factor de modificación de rigidez para el caso de estudio 2 – Etabs

- Cargas Vivas (kN/m²)

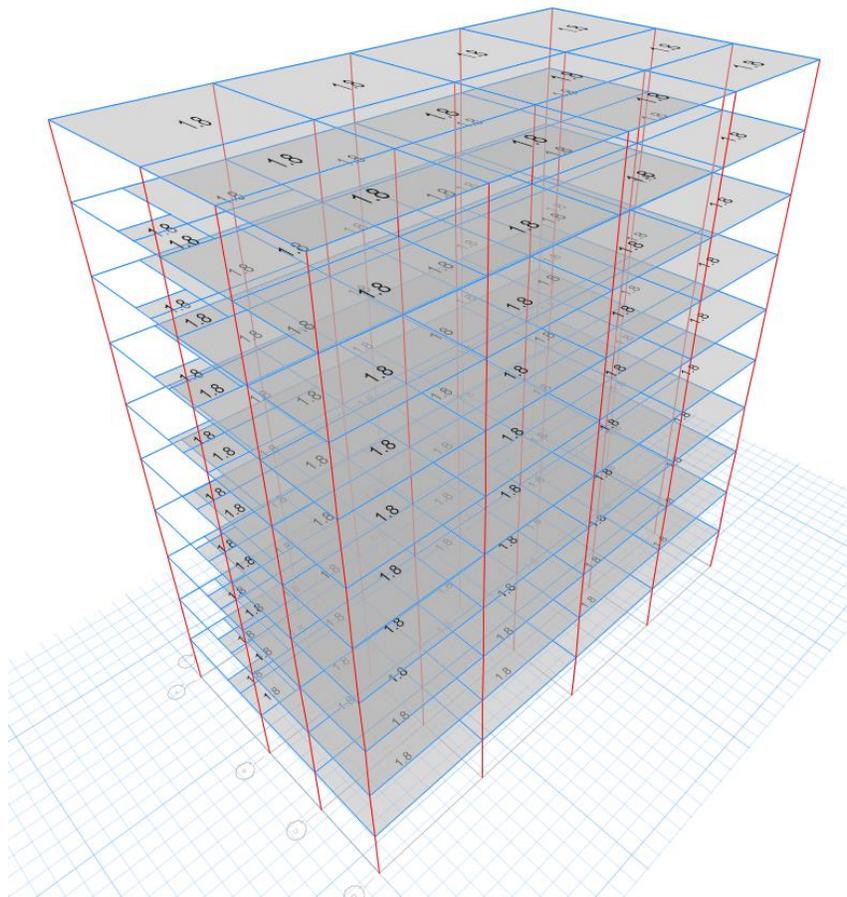


Figura 45. Cargas vivas para el caso de estudio 2 – Etabs

- Cargas Muertas (kN/m²)

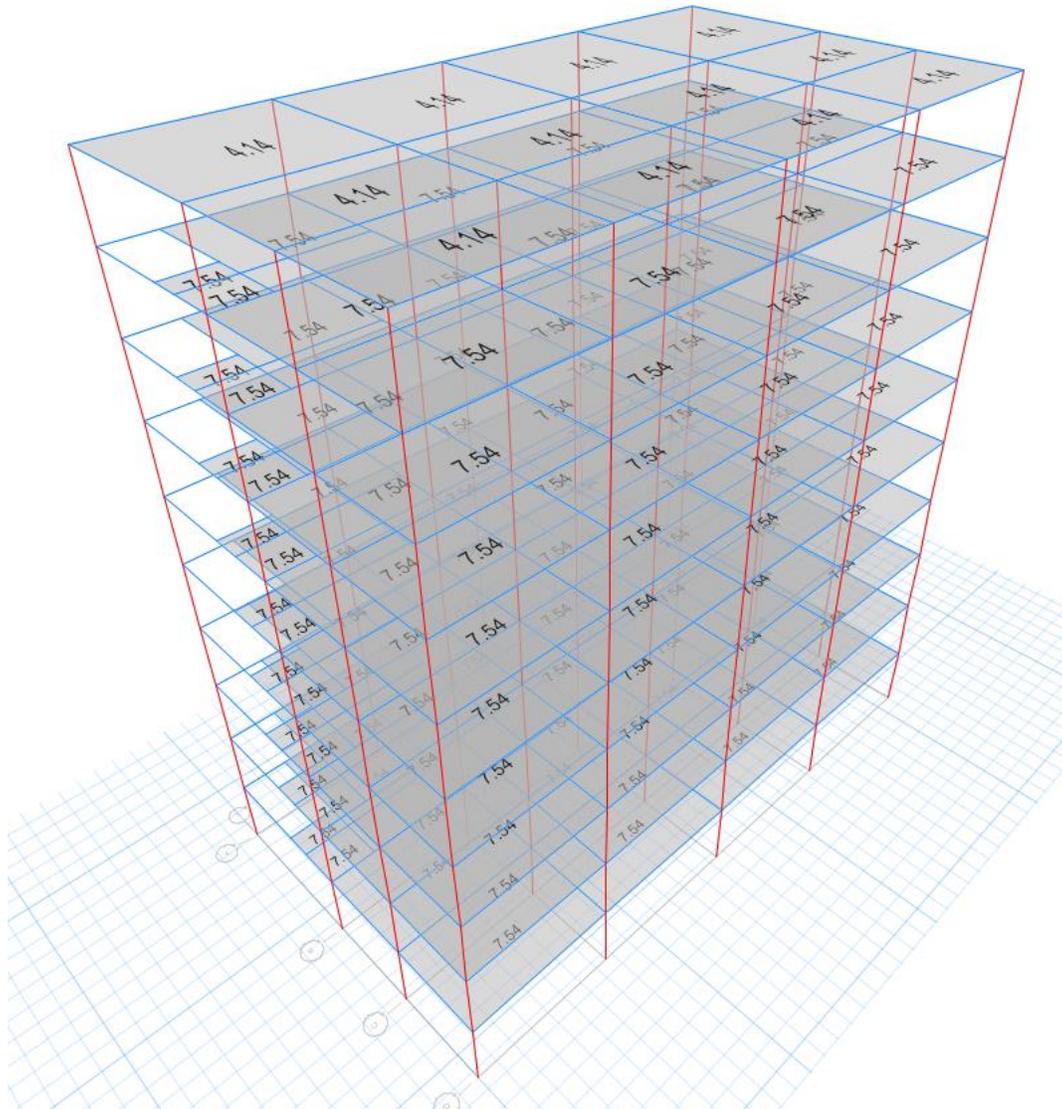


Figura 47. Cargas muertas para el caso de estudio 2 – Etabs

- Cargas Muertas (Escaleras) (kN/m)

PESO ESCALERA-MONOGRAFÍA U DE A		
GEOMETRIA DE LA LOSA		
$l_1 =$	4.25 m	$f_y =$ 420 MPa
$H =$	1.75 m	$f'c =$ 21 MPa
$c =$	16 cm	$h =$ 30 cm
$e_1 =$	$l/20 (0.4 + f_y/700) =$ 213 mm	
	Espesor escogido = 15 cm	
	Pendiente $a = h/l_1 =$ 22.38 °	
CARGAS		
Peso propio de la losa =	3.89	kN/m ²
Peso propio de peldaños =	1.92	kN/m ²
Acabado peldaños =	1.35	kN/m ²
Afinado Inferior =	0.48	kN/m ²
Carga Muerta Total =	7.64	kN/m ²

Figura 48. Cálculo de cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 2 – Etabs

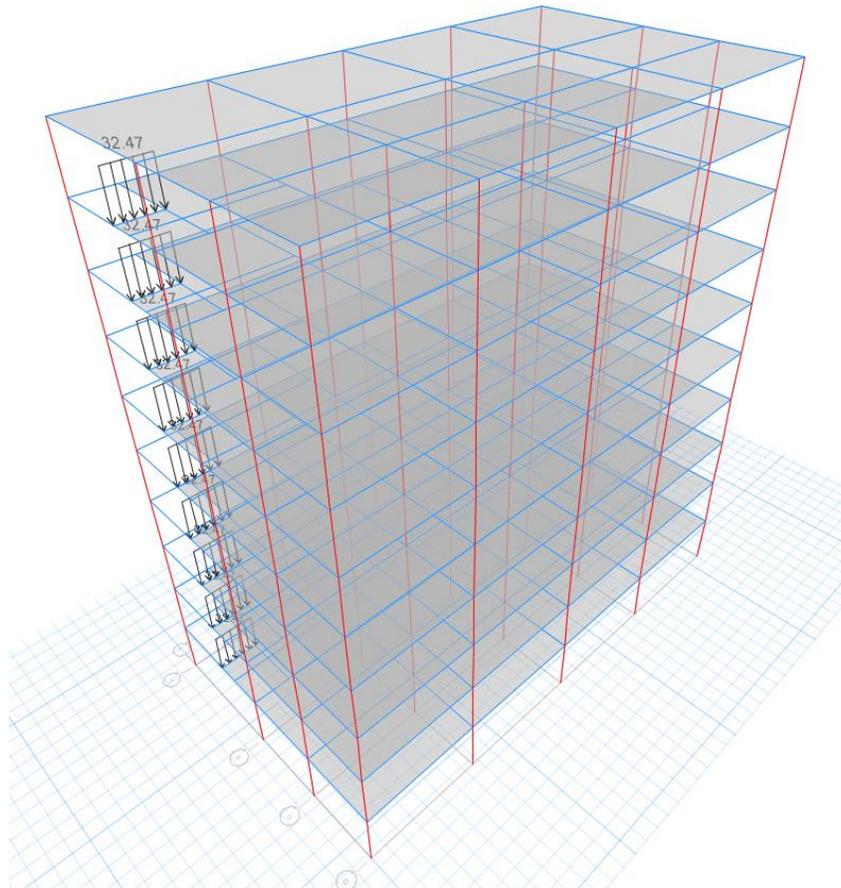


Figura 49. Cargas muertas en escaleras para el caso de estudio 2 – Etabs

- **Factor de Longitud Rígida de Nudos**

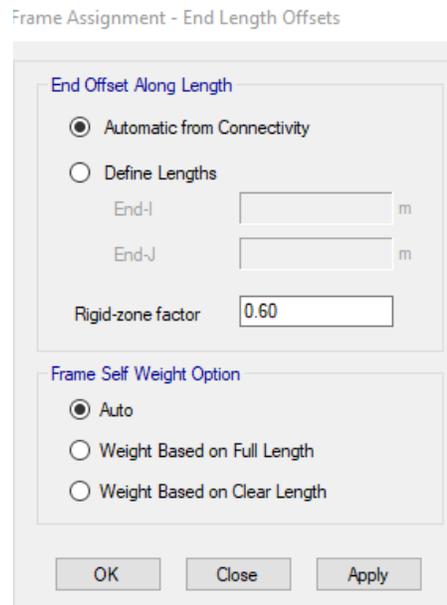


Figura 50. Factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 2 – Etabs

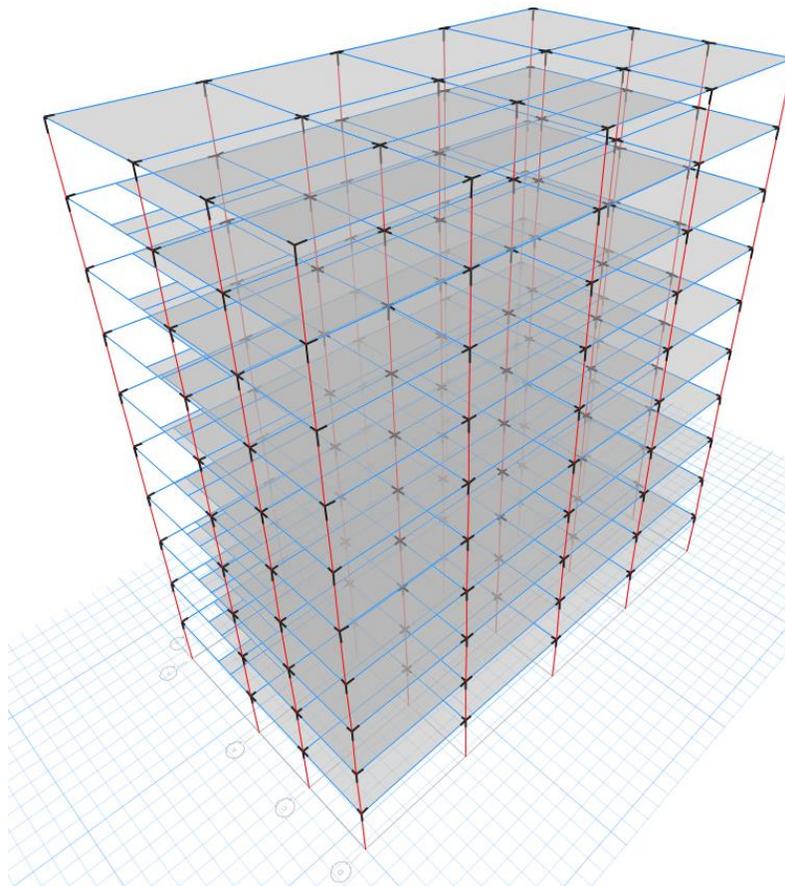


Figura 51. Vista en 3D factor de longitud rígida de nudos para el caso de estudio 2 – Etabs

- Masa Sísmica

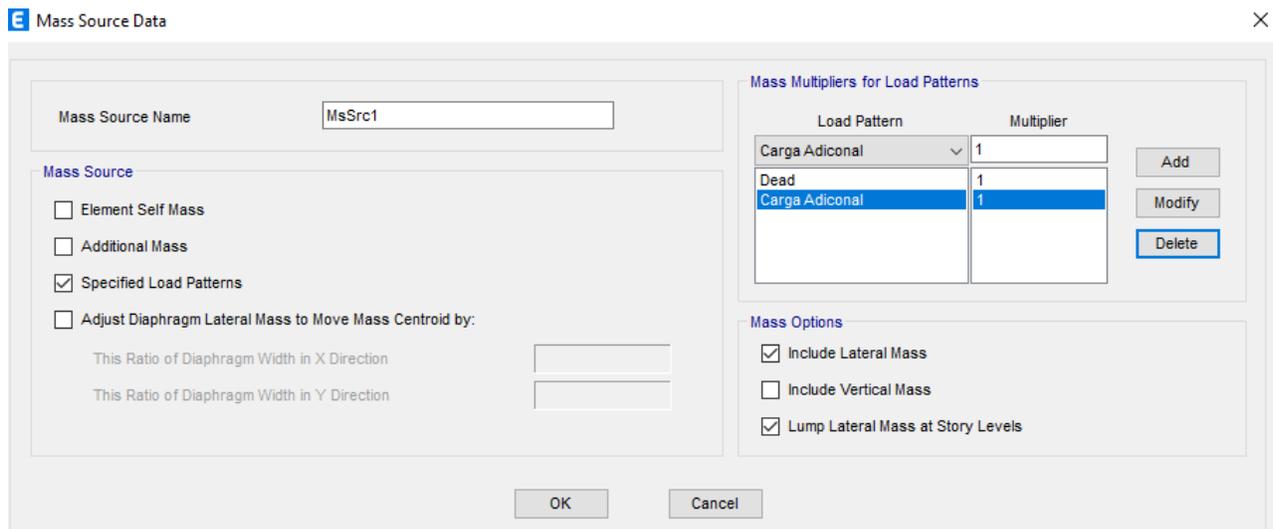


Figura 52. Masa sísmica para el caso de estudio 2 – Etabs

- Factor de Ajuste a la cortante basal en el Eje X-1.075

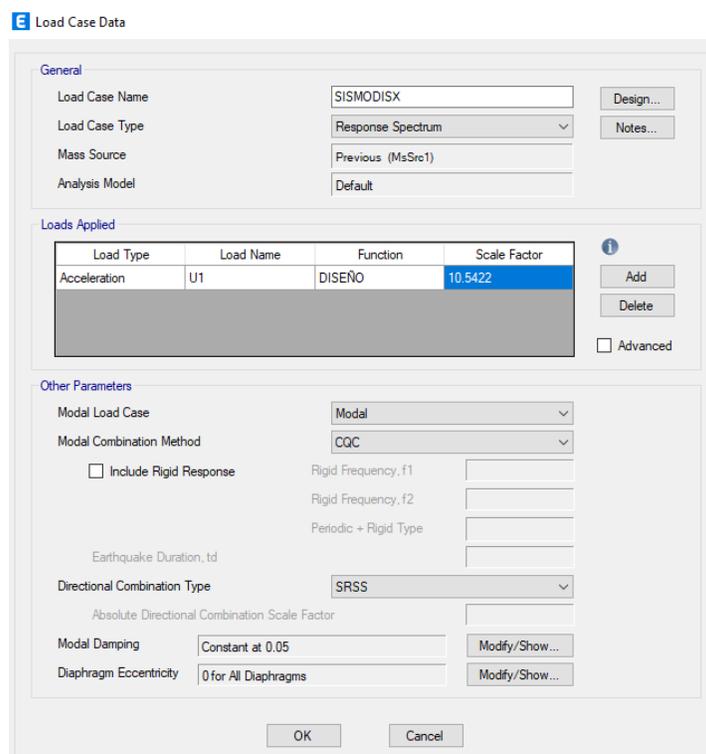


Figura 53. Factor de ajuste a la cortante basal para el caso de estudio 2 – Etabs

General

Load Case Name: SISMODERIVAS-X [Design...]

Load Case Type: Response Spectrum [Notes...]

Mass Source: Previous (MsSre1)

Analysis Model: Default

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Acceleration	U1	DERIVAS	1054.215

[Add] [Delete] [Advanced]

Other Parameters

Modal Load Case: Modal

Modal Combination Method: CQC

Include Rigid Response

Rigid Frequency, f1: []

Rigid Frequency, f2: []

Periodic + Rigid Type: []

Earthquake Duration, td: []

Directional Combination Type: SRSS

Absolute Directional Combination Scale Factor: []

Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]

Diaphragm Eccentricity: 0 for All Diaphragms [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Figura 54. Factor de ajuste a la cortante basal para el caso de estudio 2 – Etabs.

5.3.4. Resultados

- Sección de vigas de 0.5m x 0.7m de 28 MPa.
- Sección de Columna de 0.7m x 0.9m de 35 MPa.
- **Chequeo Derivas Finales Secciones Fisuradas**
 - **Derivas Eje Y**
 - Deriva Y (sin multiplicar por 0.7): 0.95%
 - Deriva Y fisurada (multiplicada por 0.7): 0.665% (Cumple)
 - **Derivas Eje X**
 - Deriva X (sin multiplicar por 0.7): 1.12%
 - Deriva X fisurada (multiplicada por 0.7): 0.784% (Cumple)

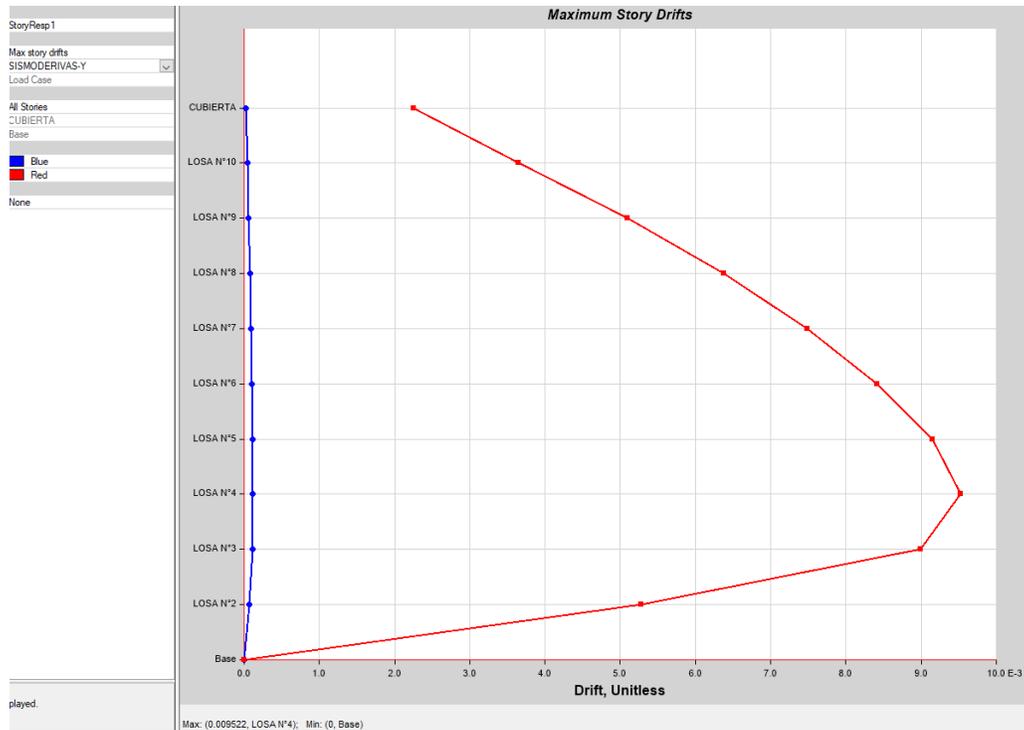


Figura 55. Derivas Eje Y para el caso de estudio 2 – Etabs

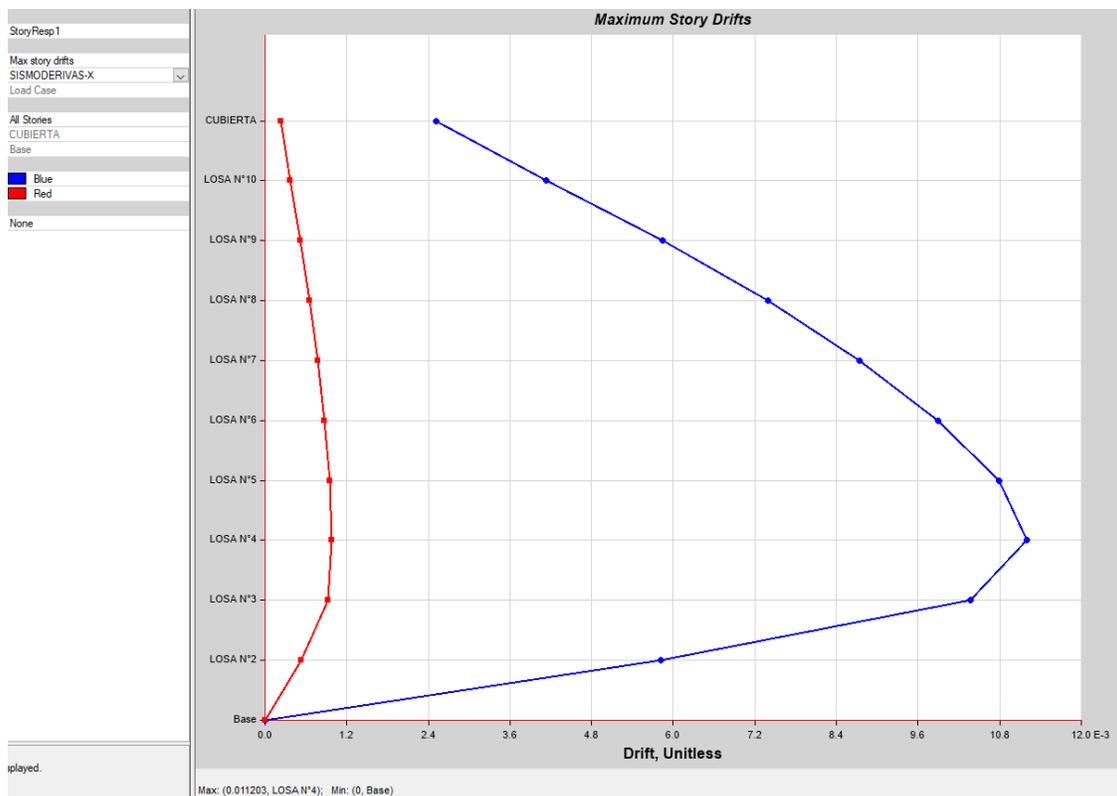


Figura 56. Derivas Eje X para el caso de estudio 2 – Etabs

- **Participación Masa**

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
Case	Mode	Period [s]	UX	UY	SumUX	SumUY
Modal	1	1.616	0.797	0.000	0.797	0.000
Modal	2	1.421	0.000	0.801	0.797	0.801
Modal	3	1.223	0.002	0.000	0.799	0.801
Modal	4	0.507	0.099	0.000	0.898	0.801
Modal	5	0.450	0.000	0.102	0.898	0.903
Modal	6	0.389	0.000	0.000	0.898	0.903
Modal	7	0.279	0.040	0.000	0.938	0.903
Modal	8	0.250	0.000	0.039	0.938	0.942
Modal	9	0.217	0.000	0.000	0.938	0.942
Modal	10	0.181	0.023	0.000	0.961	0.942
Modal	11	0.165	0.000	0.022	0.961	0.964
Modal	12	0.143	0.000	0.000	0.961	0.964

Tabla 6. Participación de Masa para el caso de estudio 2.

5.3.5. Presupuesto

En este aparte se da a conocer el presupuesto de las actividades de obra más relevantes para el objetivo de la presente monografía, donde para el segundo caso de estudio se calcula el costo directo de la implementación del método de mejoramiento del suelo empleado, el cual corresponde a actividades como excavación, lleno y compactación de material seleccionado, de igual forma se incluye actividades como la construcción de los elementos estructurales como son la cimentación, columnas y vigas, por lo tanto, se procede con el cálculo de cantidades de obras y valor del precio unitario de las siguientes actividades de obra:

- Excavación mecánica de material heterogéneo DE 4-6 m, bajo cualquier grado de humedad.
- llenos material seleccionado, compactados mecánicamente. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.
- Suministro, transporte e instalación de acero de refuerzo figurado FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado (Unidad en kg).
- Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 MPa, Compra de mezcla (unidad en m³).

- Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 MPa, Compra de mezcla (unidad en m³).

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA			
PRESUPUESTO GENERAL-SUELO TIPO D					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
1	EXCAVACIÓN MECÁNICA de material heterogéneo de 6 m en adelante, bajo cualquier grado de humedad.	m3	5.672,20	\$ 57.117,00	\$ 323.979.047,40
2	LLENOS MATERIAL SELECCIONADO, compactados mecánicamente hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.	m3	3.686,93	\$ 79.359,00	\$ 292.591.077,87
3	Suministro, transporte e instalación de ACERO DE REFUERZO FIGURADO FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado.	kg	74.209,36	\$ 5.961,00	\$ 442.361.994,96
4	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 Mpa (Compra de mezcla)	m3	441,00	\$ 898.438,00	\$ 396.211.158,00
5	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 Mpa (Compra de mezcla)	m3	1.228,20	\$ 754.877,00	\$ 927.139.931,40
COSTO TOTAL					\$ 2.382.283.210,00
ÁREA CONSTRUIDA					5.672,20
VALOR m² DE LA SUPERESTRUCTURA					\$ 419.992,81

Tabla 7. Presupuesto de superestructura del caso de estudio 2.

El presupuesto de la construcción de la superestructura apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo D, se calculó luego de realizar la modelación, el análisis de la estructura y chequeo de cumplimiento de parámetros normativos como desplazamientos, solicitaciones y derivas. Dicho presupuesto se determinó a partir del cálculo y recopilación de cantidades de obra, precios y rendimiento de materiales, equipos y mano de obra y análisis de precios unitarios. Cabe resaltar que en el presente presupuesto no se tiene en cuenta el costo de los demás elementos estructurales y no estructurales, pero si tiene en cuenta las actividades del mejoramiento del suelo.

En el capítulo de Anexos se especifica el listado de los materiales a utilizar en las respectivas actividades de obra mencionadas anteriormente, con su respectivo costo, en concordancia con los precios del mercado de la zona; de igual forma, en la parte de anexos se muestra el valor de alquiler de los equipos, el precio de la mano de obra con su respectivo factor prestacional, de acuerdo con la respectiva normativa y los análisis de precios unitarios (APU).

6. Análisis de Resultados

- Para el caso de estudio 1, que corresponde a la modelación de la estructura apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo E, se obtuvo como resultado una sección de vigas de 0.7m x 0.9m de 28 MPa y una sección de Columna de 0.8m x 1.0m de 35 MPa.
- Para el caso de estudio 2, corresponde a la modelación de la estructura apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo D, se obtuvo como resultado una sección de vigas de 0.5m x 0.7m de 28 MPa y una sección de Columna de 0.7m x 0.9m de 35 MPa.
- El presupuesto de la construcción de la superestructura apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo E es de \$2.497.579.993,00 pesos m/l, y \$440.319,45 pesos m/l por área construida.
- El presupuesto de la construcción de la superestructura apoyado sobre un suelo con perfil sísmico tipo D, considerando el mejoramiento del suelo utilizando el método de reemplazo de suelo por material seleccionado debidamente compactado, es de \$ 2.382.283.210 pesos m/l, y \$ 419.992,81 pesos m/l por área construida.
- Al considerar el cambio de tipología de suelo de perfil sísmico suelo tipo E a suelo Tipo D, se obtuvo un ahorro de ciento quince millones doscientos noventa y seis mil setecientos ochenta y tres pesos m/l (\$115.296.783) lo que representa un 4.61%
- El peso de la estructura emplazada en un perfil de suelo D es de 64.652 kN, mientras que para el suelo E es de 78.913 kN, lo que da una reducción de este de un 20.60%, lo que también reduce costos al evaluar tema de fundaciones.
- El periodo de la estructura para perfil para el perfil de suelo D es de 1.616 s y para el suelo E es de 1.099 s.
- La cortante en la base para la estructura ubicada en el suelo con perfil sísmico D es de 26.919 kN y para el suelo con perfil sísmico E es de 52.571 kN, incrementando está en un 48.79% para este último perfil de suelo. Esto se refleja en el aumento de las cuantías y refuerzos al modificar el perfil sísmico de suelo tipo D a suelo tipo E.

7. Conclusiones

- Aunque el ahorro es significativo en el caso de estudio, no es un porcentaje tan alto para garantizar que en proyectos generalizados siempre sea viable realizar el cambio de tipología del suelo.
- Al realizar el mejoramiento del suelo para cambiar el perfil sísmico utilizando el método de reemplazo de suelo por material seleccionado debidamente compactado, se obtuvo una reducción en las secciones de los elementos estructurales como las vigas y columnas. Además, para la construcción de la superestructura se obtiene una reducción 4.61%, y una reducción del 20.60%, respectivamente, en la masa de estos elementos.
- Al realizar un cambio de perfil sísmico con el fin de optimizar gastos, se recomienda, inicialmente, tener parámetros del geotecnista para ambas tipologías de suelos para obtener un estimado inicial que visualice el potencial ahorro. Posteriormente, se deben realizar los distintos análisis para cambios de perfil sísmico con sus recomendaciones y el cambio en el diseño estructural, incorporando los cambios sísmicos que deriven del cambio del perfil sísmico del suelo.
- Constructivamente, se pueden optimizar tiempos de entrega con el cambio de tipología, ya que las secciones tanto de vigas como de columnas al ser menores, requieren menos tiempo de armado y vaciado.
- Para este tipo de análisis se debe hacer un trabajo mancomunado entre el diseñador estructural y el geotecnista, solo con apoyo entre estos dos profesionales se puede llegar a obtener una conclusión importante para analizar cada proyecto.
- Al realizar cambios de perfil sísmico no se compromete la seguridad de la futura estructura, ya que para ambos casos se debe realizar un análisis detallado de los respectivos profesionales, llegando en ambos casos a una estructura segura que cumpla con los lineamientos planteados en la Norma Sismo Resistente (NSR-10).

8. Referencias

- Brama M. Das. (1893). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Tomo III), pp. 722
- Vélez J.C., Castañeda F.A. (2011). Impacto Económico De La Nsr-10 en el Sistema Sismo Resistente de Edificaciones DMO de Concreto Reforzado.
- Moreno, J. (2019). Soluciones Geopier para la Mejora y Refuerzo de Suelos. Lisboa, Portugal.
- Bello, C. (2013). Primera Experiencia Colombiana en Construcción de Pilas de Agregado Compacto – Geopier Impact – en un Proyecto de Vivienda de Interés Social. Bogotá D.C. Escuela Colombiana De Ingeniería – Julio Garavito.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente.
- Carmona, J.A. (2019). Sistema de Cimentación para Edificaciones de Uso Habitacional de 4 Niveles, Usando Inclusiones de Grava Compactada (Método Geopier). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huaman, M. A. (2019). Mejoramiento Del Suelo Arcilloso Utilizando Geoestructuras De Geopier Para Una Edificación En La Avenida Juan Lecaros Frente Al Estadio Municipal De Puente Piedra. Universidad Cesar Vallejo. Lima-Perú.
- Doroteo, C. (2014). Mejoramiento de suelo por sustitución de material. Puebla, México.
- Jiménez, M.C., Otálvaro, G. A. (2020). Estudio comparativo del comportamiento de cimentaciones superficiales en suelos blandos, al implementar rellenos granulares como técnica de mejoramiento. Bogotá, Colombia

9. Anexos

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA		
LISTADO DE MATERIALES				
#	CÓDIGO	UNIDAD	INSUMO	PRECIO
1	M001	kg	Acero de refuerzo PDR-60, Fy: 4200 kg/cm ²	\$ 4.020,60
2	M002	m ³	Concreto resistencia 21 Mpa	\$ 478.131,65
3	M003	m ³	Concreto resistencia 28 Mpa	\$ 521.200,42
4	M004	m ³	Material seleccionado para relleno	\$ 63.212,46
5	M005	L	Agua	\$ 90,00
6	M006	kg	Alambre negro para amarre calibre 18	\$ 7.449,50
7	M007	kg	Emulsion acuosa de parafina para curado de concreto	\$ 7.904,62

Tabla 8. Listado de precios de materiales e insumos.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA		
LISTADO DE EQUIPOS				
#	CÓDIGO	UNIDAD	INSUMO	PRECIO
1	E001	hora	Compresor portátil de 70 a 120 HP, con martillo	\$ 51.029,14
2	E002	hora	Retroexcavadora sobre llantas	\$ 152.672,56
3	E003	hora	Cizalla manual de 90 cm	\$ 1.820,69
4	E004	hora	Compactador manual (saltarín) peso de operación (kg.) 52, fuerza de impacto por golpe (KN) 12	\$ 7.809,34
5	E005	hora	Vibrador de concreto	\$ 4.666,39
6	E006	hora	Formaleta metálica para concreto (m ²)	\$ 871,55
7	E007	hora	Aspersor manual de 20 litros	\$ 3.520,33
8	E008	hora	Motobomba 4 pulgadas	\$ 7.251,53

Tabla 9. Listado de precios de alquiler de equipos.

UNIDAD		ÍTEM	VALOR
mes		Salario mínimo legal mensual vigente - SMLMV básico 2023	\$ 1.160.000,00
mes		Subsidio de transporte 2023	\$ 140.606,00
mes		Salario mínimo legal mensual vigente - SMLMV 2023 + Subsidio de transporte 2023	\$ 1.300.606,00
día		Jornal + subsidio de transporte 2023	\$ 43.353,53
%		Factor prestacional INVIAS vigente	\$ 0,85
día		Jornal básico con factor prestacional	\$ 71.533,33
mes		salario basico SMLMV 2023 con factor prestacional	\$ 2.146.000,00

#	CÓDIGO	UNIDAD	INSUMO	PRECIO	FACTOR DE JORNAL
1	MO001	día	Obrero	\$ 71.533,33	1
2	MO002	día	Oficial	\$ 121.606,67	1,7

Tabla 10. Precio de mano de obra.

ITEM		DESCRIPCION	UN	CANTIDAD	VR. UNIT.	VR. TOTAL
1		EXCAVACIÓN MECÁNICA de material heterogéneo de 6 m en adelante, bajo cualquier grado de humedad.	m3	1,00		\$ 57.117,00
I. EQUIPO Y HERRAMIENTA						\$ 26.710,26
		HERRAMIENTA MENOR	5% MO			\$ 59,61
E002		Retroexcavadora sobre llantas	hora	0,200	\$ 132.800	\$ 26.560,00
E008		Motobomba 4 pulgadas	hora	0,013	\$ 7.252	\$ 90,64
II. MATERIALES						\$ 3.214,08
M008		Entibado Temporal en Teleras	m2	0,18	\$ 17.856,00	\$ 3.214,08
III. MANO DE OBRA						\$ 1.192,22
MO001		Obrero	día	60,00	\$ 71.533	\$ 1.192,22
IV. TRANSPORTE						\$ 26.000,00
		Transporte material sobrante hasta el botadero o sitio donde lo indique la interventoría.	m3	1,30	\$ 15.000	\$ 19.500,00
		Derechos botadero	m3	1,30	\$ 5.000	\$ 6.500,00

Tabla 11. Análisis de Precio Unitario de la Excavación Mecánica.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA			
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	VR. UNIT.	VR. TOTAL
2	LLENOS MATERIAL SELECCIONADO, compactados mecánicamente hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.	m3	1,00		\$ 79.359,00
I. EQUIPO Y HERRAMIENTA					\$ 3.294,05
	HERRAMIENTA MENOR	5% MO			\$ 170,32
E004	Compactador manual (saltarín) peso de operación (kg.) 52, fuerza de impacto por golpe (KN) 12	hora	0,400	\$ 7.809	\$ 3.123,74
II. MATERIALES					\$ 67.562,20
M004	Material seleccionado para relleno	m3	49.894,00	\$ 1,30	\$ 64.862,20
M005	Agua	L	90,00	\$ 30	\$ 2.700,00
					\$ -
III. MANO DE OBRA					\$ 6.812,70
MO001	Obrero	día	21,00	\$ 71.533	\$ 3.406,35
MO001	Obrero	día	21,00	\$ 71.533	\$ 3.406,35
IV. TRANSPORTE					\$ 1.690,00
	Transporte de material de relleno	m3	1,30	\$ 1.300	\$ 1.690,00

Tabla 12. Análisis de Precio Unitario del lleno de material seleccionado.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA			
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	VR. UNIT.	VR. TOTAL
3	Suministro, transporte e instalación de ACERO DE REFUERZO FIGURADO FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado.	kg	1,00		\$ 5.961,00
I. EQUIPO Y HERRAMIENTA					\$ 66,35
	HERRAMIENTA MENOR	5% MO			\$ 11,73
E003	Cizalla manual de 90 cm	hora	0,030	\$ 1.821	\$ 54,62
II. MATERIALES					\$ 5.156,13
M001	Acero de refuerzo PDR-60, Fy: 4200 kg/cm ²	kg	1,05	\$ 4.641	\$ 4.873,05
M006	Alambre negro para amarre calibre 18	kg	0,038	\$ 7.450	\$ 283,08
					\$ -
III. MANO DE OBRA					\$ 633,25
MO001	Obrero	día	305,00	\$ 71.533	\$ 234,54
MO002	Oficial	día	305,00	\$ 121.607	\$ 398,71
IV. TRANSPORTE					\$ 105,00
	Transporte de acero	kg-km	1,05	\$ 100	\$ 105,00

Tabla 13. Análisis de Precio Unitario de S.T.I. de acero de refuerzo de 420 Mpa.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA			
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	VR. UNIT.	VR. TOTAL
4	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 Mpa (Compra de mezcla)	m3	1,00		\$ 898.438,00
I. EQUIPO Y HERRAMIENTA					\$ 34.821,15
	HERRAMIENTA MENOR	5% MO			\$ 223,54
E005	Vibrador de concreto	hora	0,500	\$ 4.666	\$ 2.333,20
E006	Formaleta metálica para concreto (m2)	hora	35,000	\$ 872	\$ 30.504,25
E007	Aspersor manual de 20 litros	hora	0,500	\$ 3.520	\$ 1.760,17
II. MATERIALES					\$ 827.616,52
M002	Concreto resistencia 35 Mpa	m3	1,05	\$ 780.678	\$ 819.711,90
M007	Emulsion acuosa de parafina para curado de concreto	kg	1,00	\$ 7.905	\$ 7.904,62
III. MANO DE OBRA					\$ 34.425,42
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO002	Oficial	día	16,00	\$ 121.607	\$ 7.600,42
IV. TRANSPORTE					\$ 1.575,00
	Transporte de concreto	m3	1,05	\$ 1.500	\$ 1.575,00

Tabla 14. Análisis de Precio Unitario de S.T.I. de concreto de 35 Mpa.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO		 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA			
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	VR. UNIT.	VR. TOTAL
4	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 Mpa (Compra de mezcla)	m3	1,00		\$ 754.877,00
I. EQUIPO Y HERRAMIENTA					\$ 34.821,15
	HERRAMIENTA MENOR	5% MO			\$ 223,54
E005	Vibrador de concreto	hora	0,500	\$ 4.666	\$ 2.333,20
E006	Formaleta metálica para concreto (m2)	hora	35,000	\$ 872	\$ 30.504,25
E007	Aspersor manual de 20 litros	hora	0,500	\$ 3.520	\$ 1.760,17
II. MATERIALES					\$ 684.055,27
M003	Concreto resistencia 28 Mpa	m3	1,05	\$ 643.953	\$ 676.150,65
M007	Emulsion acuosa de parafina para curado de concreto	kg	1,00	\$ 7.905	\$ 7.904,62
III. MANO DE OBRA					\$ 34.425,42
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO001	Obrero	día	16,00	\$ 71.533	\$ 4.470,83
MO002	Oficial	día	16,00	\$ 121.607	\$ 7.600,42
IV. TRANSPORTE					\$ 1.575,00
	Transporte de concreto	m3	1,05	\$ 1.500	\$ 1.575,00

Tabla 15. Análisis de Precio Unitario de S.T.I. de concreto de 28 Mpa.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO						 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	
ITEM	EXCAVACIÓN MECÁNICA de material heterogéneo de 6 m en adelante, bajo cualquier grado de humedad.					UNIDAD:	
1						m3	
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	AREA	CANT	TOTAL	DETALLES	
	20,00		1,54	20,00	615,76		
					-		
					-		
					-		
					-		
					-		
				TOTAL	615,76		
ITEM	LLENOS MATERIAL SELECCIONADO, compactados mecánicamente hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.					UNIDAD:	
2						m3	
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES	
	31,60	17,95	10,00		5.672,20		
					-		
					-		
					-		
					-		
					-		
				TOTAL	5672,20		
ITEM	Suministro, transporte e instalación de ACERO DE REFUERZO FIGURADO FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado.					UNIDAD:	
3						kg	
UBICACIÓN	LONG	CANT	ALTURA	PESO KG/m	TOTAL	DETALLES	
Columnas - Refuerzo longitudinal (22N ⁷) + 15% de traslazo		360,00	35,00	3,04	44.078,58		
Columnas - Refuerzo transversal (1/2") + 15% de traslazo	3,40	240,00		0,99	932,77		
	2,46	240,00		0,99	674,89		
	2,18	240,00		0,99	598,07		
Vigas - Refuerzo longitudinal (24N ⁵) + 15% de traslazo	712,50	24,00		1,55	30.520,08		
Vigas - Refuerzo transversal (3/8") + 15% de traslazo	1,20	5.640,00		0,56	4.358,59		
	1,20	4.308,33		0,56	3.329,48		
				TOTAL	84492,46		
ITEM	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 Mpa (Compra de mezcla)					UNIDAD:	
4						m3	
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES	
COLUMNAS 0.80x1.00	0,80	1,00	35,00	20,00	560,00		
PILAS D:1.40					615,76		
					-		
					-		
					-		
					-		
				TOTAL	1175,76		
ITEM	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 Mpa (Compra de mezcla)					UNIDAD:	
5						m3	
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES	
VIGAS 0.70x0.90 - EJE A-EJE D	0,70	0,90	27,60	20,00	347,76		
VIGAS 0.70x0.90 - EJE B-EJE C	0,70	0,90	28,40	20,00	357,84		
VIGAS 0.70x0.90 - EJES 1-5	0,70	0,90	15,55	50,00	489,83		
					-		
					-		
					-		
				TOTAL	1195,43		

Tabla 16. Memoria de cantidades para caso de estudio 1.

INFLUENCIA DEL MEJORAMIENTO DEL PERFIL SÍSMICO DEL SUELO EN EL DISEÑO DE PÓRTICOS DE CONCRETO REFORZADO: REVISIÓN DE LITERATURA Y CASO DE ESTUDIO							 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	
ITEM	EXCAVACIÓN MECÁNICA de material heterogéneo de 6 m en adelante, bajo cualquier grado de humedad.						UNIDAD:	m3
1								
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES		
	31,60	17,95	10,00		5.672,20			
					-			
					-			
					-			
					-			
					-			
				TOTAL	5672,20			
ITEM	LLENOS MATERIAL SELECCIONADO, compactados mecánicamente hasta alcanzar una densidad seca no inferior al 98% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Incluye material de préstamo, transporte interno y todo lo necesario para su correcta compactación.						UNIDAD:	m3
2								
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES		
	31,60	17,95	6,50		3.686,93			
					-			
					-			
					-			
					-			
					-			
				TOTAL	3686,93			
ITEM	Suministro, transporte e instalación de ACERO DE REFUERZO FIGURADO FY= 420 Mpa-60000 PSI, corrugado.						UNIDAD:	kg
3								
UBICACIÓN	LONG	CANT	ALTURA	PESO KG/m	TOTAL	DETALLES		
Columnas - Refuerzo longitudinal (18N*7) + 15% de traslazo		360,00	35,00	3,04	44.078,58			
Columnas - Refuerzo transversal (1/2") + 15% de traslazo	3,20	240,00		0,99	877,90			
	2,26	240,00		0,99	620,02			
	2,18	240,00		0,99	598,07			
Vigas - Refuerzo longitudinal (16N*5) + 15% de traslazo	712,50	16,00		1,55	20.346,72			
Vigas - Refuerzo transversal (3/8") + 15% de traslazo	1,20	5.640,00		0,56	4.358,59			
	1,20	4.308,33		0,56	3.329,48			
				TOTAL	74209,36			
ITEM	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 35 Mpa (Compra de mezcla)						UNIDAD:	m3
4								
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES		
COLUMNAS 0.70x0.90	0,70	0,90	35,00	20,00	441,00			
					-			
					-			
					-			
					-			
					-			
				TOTAL	441,00			
ITEM	Suministro, transporte y colocación de mezcla de concreto de 28 Mpa (Compra de mezcla)						UNIDAD:	m3
5								
UBICACIÓN	LARGO	ANCHO	ALTURA	CANT	TOTAL	DETALLES		
VIGAS 0.50x0.70 - EJE A-EJE D	0,50	0,70	27,50	20,00	192,50			
VIGAS 0.50x0.70 - EJE B-EJE C	0,50	0,70	28,30	20,00	198,10			
VIGAS 0.50x0.70 - EJES 1-5	0,50	0,70	15,45	50,00	270,38			
LOSA FLOTANTE	1,00	31,60	17,95		567,22			
					-			
					-			
					-			
				TOTAL	1228,20			

Tabla 17. Memoria de cantidades para caso de estudio 2.