

Desempeño de una Edificación de 12 Pisos Diseñada con Sistema Estructural de Resistencia
Sísmica (DES) de Muros de Carga en Concreto Reforzado Mediante el Método Estático no
Lineal

Abelardo Uribe Ramírez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Ingeniería Estructural

Director

Edison Osorio Bustamante

Doctorado en Ingeniería de la Construcción

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería Estructural

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mi Dios, todas las veces su amor se ve reflejado en mi esposa, mis hijos y mi familia.

A mi esposa por el inmenso amor, la paciencia, el ánimo dado para no desfallecer, el tiempo robado y no disfrutado, mi cielo mis logros siempre serán los tuyos.

A mis hijos, son el motor para seguir esforzándome, demostrando que nunca termina el aprendizaje.

A mi mami en el cielo, desde allá se le mojarán los ojos por el logro de su hijo consentido.

A mis hermanas, mis amores eternos.

Al resto de mi familia, en cada uno, hay un granito de amor, cariño y felicidad que ayudan es este aprendizaje.

Agradecimientos

A mis docentes de maestría, por la enseñanza.

Al ing. Edison Osorio, mi tutor y director de tesis, por su transmisión de conocimientos valiosos, además su amistad, muchas gracias.

Al ing. Alvaro Viviescas, director de la maestría, por su dedicación y ganas que todos saliéramos adelante culminando lo iniciado.

Al ing. Luis Eduardo Zapata, una enseñanza de superación.

A mis compañeros, fueron dos años de compartir conocimientos y amistad.

A mis compañeros de viaje, los ing. Dean Montañez y Nelson Mendoza, todas las semanas

Contenido

| | Pág. |
|------------------------------------------------------------|------|
| Introducción | 16 |
| 1. Objetivos | 17 |
| 1.1 Objetivo General | 17 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 17 |
| 2. Fase 1: Análisis y Diseño Elástico Lineal..... | 18 |
| 2.1 Fase 1: Análisis y Diseño Elástico Lineal..... | 18 |
| 2.2 Característica de la Estructura | 18 |
| 2.2.1 Concreto no confinado..... | 19 |
| 2.2.2 Acero de refuerzo..... | 20 |
| 2.3 Descripción del sistema estructural | 20 |
| 2.3.1 Dimensiones de los elementos estructurales..... | 21 |
| 2.3.2 Localización de la estructura | 23 |
| 2.3.3 Capacidad de disipación de energía..... | 24 |
| 2.3.4 Consideraciones de resistencia contra el fuego | 24 |
| 2.3.5 Datos del estudio geotécnico | 25 |
| 2.4 Análisis de irregularidades en planta | 25 |
| 2.4.1 Irregularidad torsional, Tipo 1aP..... | 25 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2 Irregularidad torsional extrema, Tipo 1bP | 26 |
| 2.4.3 Irregularidad por retrocesos en las esquinas, Tipo 2P | 26 |
| 2.4.4 Irregularidad por discontinuidades en el diafragma, Tipo 3P | 27 |
| 2.4.5 Irregularidad por retrocesos desplazamientos de los planos de acción, Tipo 4p | 27 |
| 2.5 Análisis de irregularidades en altura | 27 |
| 2.6 Análisis de irregularidad por ausencia de redundancia | 28 |
| 2.7 Evaluación de cargas | 29 |
| 2.8 Fuerzas sísmicas de diseño | 30 |
| 2.8.1 Espectro elástico de aceleración | 30 |
| 2.8.2 Masa de la estructura | 31 |
| 2.8.3 Cálculo de la fuerza horizontal equivalente | 32 |
| 2.9 Modelos de análisis y resultados | 32 |
| 2.9.1 Modelo 1 | 33 |
| 2.9.2 Modelo 2 | 33 |
| 2.9.3 Modelo 3 | 33 |
| 2.10 Resultados del análisis | 34 |
| 2.10.1 Análisis modal | 34 |
| 2.10.2 Desplazamiento máximo de piso | 35 |
| 2.10.3 Análisis de la deriva | 35 |
| 3. Diseño | 37 |
| 3.1 Combinaciones de diseño | 37 |
| 3.2 Diseño losa de entrepiso | 38 |

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1 Revisión del espesor de la losa por deflexiones..... | 38 |
| 3.2.2 Diseño a cortante losa de entrepiso..... | 41 |
| 3.3 Diseño de muros estructurales | 43 |
| 3.3.1 Diseño por cortante | 43 |
| 3.3.2 Diseño a flexo-compresión | 46 |
| 3.3.3 Revisión del elemento de borde..... | 47 |
| 3.4 Diseño de la cimentación | 48 |
| 3.4.1 Revisión esfuerzos en la cimentación | 49 |
| 3.4.2 Diseño a flexión..... | 53 |
| 3.4.3 Revisión a cortante en losa de cimentación | 55 |
| 3.5 Diseño viga de cimentación | 56 |
| 3.5.1 Diseño a flexión..... | 56 |
| 3.5.2 Revisión a cortante viga de cimentación | 58 |
| | |
| 4. Fase 2: Análisis Estático no Lineal..... | 59 |
| 4.1 Generalidades requisitos según el ASCE 41-17 | 59 |
| 4.1.1 Tipo de edificio | 59 |
| 4.1.2 Objetivo de nivel de desempeño..... | 59 |
| 4.1.3 Categoría del riesgo | 60 |
| 4.1.4 Nivel de sismicidad..... | 60 |
| 4.1.5 Nivel de desempeño objetivo del edificio..... | 61 |
| 4.2 Modelo de análisis | 61 |
| 4.2.1 Requisitos de modelo de análisis por ASCE 41-17 | 61 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.2 Torsión | 62 |
| 4.2.3 Elemento primario y secundario | 63 |
| 4.2.4 Flexibilidad de la cimentación | 64 |
| 4.2.5 Amortiguamiento | 64 |
| 4.2.6 Efectos sísmicos en múltiples direcciones | 64 |
| 4.2.7 Efectos P- Δ en modelo de análisis | 65 |
| 4.2.8 Interacción suelo estructura | 65 |
| 4.2.9 Efecto de volcamiento para procedimientos no lineales | 66 |
| 4.2.10 Clasificación del diafragma | 67 |
| 4.3 No linealidad de los materiales | 68 |
| 4.3.1 Concreto no confinado | 68 |
| 4.3.2 Concreto confinado | 69 |
| 4.3.3 Acero de refuerzo | 70 |
| 4.4 Modelo de rótula plástica en muros | 71 |
| 4.4.1 Longitud de rotulas plásticas en muros | 72 |
| 4.5 Descripción del modelo de análisis | 73 |
| 4.5.1 Modelo de análisis | 73 |
| 4.5.2 Efecto de volcamiento para procedimientos no lineales | 74 |
| 4.6 Selección del Procedimiento de Análisis | 74 |
| 4.6.1 Relación de resistencia | 75 |
| 4.6.2 Influencia de los modos superiores | 75 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5. Resultados del Análisis | 76 |
| 5.1 Resultados análisis no lineal | 76 |
| 5.1.1 No linealidad del material y no linealidad geométrica | 76 |
| 5.1.2 No linealidad del material, no linealidad geométrica y flexibilidad de la cimentación..... | 78 |
| 5.1.3 Desplazamiento objetivo de la estructura punto de desempeño | 79 |
| 5.2 Evaluación del desempeño estructural y evaluación de la rótulas | 81 |
| 5.3 Análisis de la respuesta elástica e inelástica | 84 |
| 6. Revisión de los Elementos Primarios | 87 |
| 6.1 Chequeo del cortante en los muros para el análisis estático no-lineal | 88 |
| 6.2 Revisión del espesor del muro | 89 |
| 6.3 Revisión del elemento de borde | 90 |
| 7. Conclusiones | 92 |
| Referencias Bibliográficas | 93 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. <i>Distribución y etiquetas de muros en planta</i> | 22 |
| Figura 2. <i>Espectro elástico de aceleración de diseño como fracción de g</i> | 31 |
| Figura 3. <i>Resultados momentos M11 kN-m/m</i> | 40 |
| Figura 4. <i>Resultados momentos M22 kN-m/m</i> | 40 |
| Figura 5. <i>Resultados fuerza cortante V13 kN/m/m</i> | 42 |
| Figura 6. <i>Resultados fuerza cortante V23 kN/m/m</i> | 42 |
| Figura 7. <i>Diagrama de interacción muro M-1Y</i> | 46 |
| Figura 8. <i>Distribución de coeficientes de rigidez en la losa de cimentación</i> | 51 |
| Figura 9. <i>Modelo matemático losa de cimentación</i> | 51 |
| Figura 10. <i>Esfuerzos en la cimentación por cargas de servicio (S1=1.0D+1.0L)</i> | 53 |
| Figura 11. <i>Momento M11 en losa de cimentación. Mmax=65kN-m/m</i> | 54 |
| Figura 12. <i>Momento M22 en losa de cimentación. Mmax=50kN-m/m</i> | 55 |
| Figura 13. <i>Cortante V12 en losa de cimentación. Vmax=218kN/m</i> | 56 |
| Figura 14. <i>Envolvente de momentos en vigas de cimentación. Mmax=180kN-m</i> | 57 |
| Figura 15. <i>Diagrama de fuerza a cortante. Vmax=735 kN</i> | 58 |
| Figura 16. <i>Curva Esfuerzo-Deformación del concreto no confinado $f'c=28\text{MPa}$</i> | 69 |
| Figura 17. <i>Curva Esfuerzo-Deformación concreto confinado generado por el Etabs®2015</i> | 70 |
| Figura 18. <i>Relación Esfuerzo-Deformación del acero de refuerzo</i> | 71 |
| Figura 19. <i>Ejemplo de asignación de rótula muro M-1Y</i> | 72 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20. <i>Curva de capacidad en dirección X</i> | 77 |
| Figura 21. <i>Curva de capacidad en dirección Y</i> | 77 |
| Figura 22. <i>Curva de capacidad en X con flexibilidad en la cimentación</i> | 78 |
| Figura 23. <i>Curva de capacidad en Y con flexibilidad en la cimentación</i> | 79 |
| Figura 24. <i>Curvas bilineales en la dirección X y Y</i> | 80 |
| Figura 25. <i>Curva de capacidad dirección X con niveles básicos de desempeño</i> | 83 |
| Figura 26. <i>Curva de capacidad dirección Y con niveles básicos de desempeño</i> | 83 |
| Figura 27. <i>Parámetros de desempeño en la dirección X</i> | 85 |
| Figura 28. <i>Parámetros de desempeño dirección Y</i> | 86 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. <i>Resistencia a la compresión del concreto en elementos estructurales</i> | 19 |
| Tabla 2. <i>Dimensiones de los elementos estructurales</i> | 21 |
| Tabla 3. <i>Propiedades geométricas de los muros del sistema de resistencia sísmica</i> | 23 |
| Tabla 4. <i>Parámetros geotécnicos</i> | 25 |
| Tabla 5. <i>Evaluación de irregularidad torsional tipo 1aP en X y Y</i> | 26 |
| Tabla 6. <i>Deriva del piso i sobre la deriva del piso $i+1$</i> | 28 |
| Tabla 7. <i>Resultados del aumento de solicitud por cortante de los muros en dirección X y Y, después de la reducción de la capacidad del muro M-3X y M-20Y</i> | 29 |
| Tabla 8. <i>Evaluación de cargas del proyecto</i> | 30 |
| Tabla 9. <i>Peso total de la estructura</i> | 31 |
| Tabla 10. <i>Parámetros sísmicos y ajuste del cortante en la base</i> | 32 |
| Tabla 11. <i>Período y porcentaje de participación</i> | 34 |
| Tabla 12. <i>Desplazamiento máximo de piso</i> | 35 |
| Tabla 13. <i>Análisis de la deriva por fuerzas sísmicas</i> | 36 |
| Tabla 14. <i>Combinaciones de diseño</i> | 37 |
| Tabla 15. <i>Propiedades de los materiales utilizados en el diseño de la losa de entrepiso</i> | 38 |
| Tabla 16. <i>Deflexiones inmediatas y a largo plazo</i> | 39 |
| Tabla 17. <i>Refuerzo a flexión en la losa de entrepiso</i> | 41 |
| Tabla 18. <i>Parámetros y resistencia máxima a cortante del muro</i> | 44 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 19. <i>Resistencia a corte aportada por el concreto</i> | 44 |
| Tabla 20. <i>Refuerzo a corte del muro</i> | 45 |
| Tabla 21. <i>Refuerzo transversal del elemento de borde</i> | 48 |
| Tabla 22. <i>Parámetros y coeficientes de rigidez para la losa de cimentación</i> | 50 |
| Tabla 23. <i>Combinaciones de carga revisión y diseño de cimentación</i> | 52 |
| Tabla 24. <i>Resistencia a flexión y cortante losa cimentación</i> | 54 |
| Tabla 25. <i>Resistencia nominal a flexión y cortante de la viga de cimentación</i> | 57 |
| Tabla 26. <i>Evaluación de los efectos de la torsión dirección X</i> | 62 |
| Tabla 27. <i>Evaluación de los efectos de la torsión dirección Y</i> | 63 |
| Tabla 28. <i>Clasificación del diafragma en la dirección X</i> | 67 |
| Tabla 29. <i>Clasificación del diafragma en la dirección Y</i> | 68 |
| Tabla 30. <i>Casos de análisis ejecutados</i> | 74 |
| Tabla 31. <i>Influencia de los modos superiores de la estructura</i> | 76 |
| Tabla 32. <i>Desplazamiento objetivo para cada dirección de análisis</i> | 80 |
| Tabla 33. <i>Rotaciones asociadas a cada nivel de desempeño básico en la dirección X</i> | 82 |
| Tabla 34. <i>Rotaciones asociadas a cada nivel de desempeño básico en la dirección Y</i> | 82 |
| Tabla 35. <i>Parámetros de desempeño</i> | 87 |
| Tabla 36. <i>Corrección de refuerzo a cortante dirección X</i> | 88 |
| Tabla 37. <i>Corrección de refuerzo a cortante dirección Y</i> | 89 |
| Tabla 38. <i>Revisión de espesor del elemento de borde dirección X</i> | 90 |
| Tabla 39. <i>Revisión de espesor del elemento de borde dirección Y</i> | 91 |

Lista de Apéndices

“Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS”

Apéndice A. Planta arquitectónica

Apéndice B. Planos estructurales

Resumen

Título: Desempeño de una edificación de 12 pisos diseñada con sistema estructural de resistencia sísmica (DES) de muros de carga en concreto reforzado mediante el método estático no lineal.*

Autor: Abelardo Uribe Ramírez**

Palabras claves: muros estructurales, muros de cortante, muros delgados

Descripción:

Inicialmente se realizó el diseño estructural de un edificio de 12 pisos conformado por un sistema estructural de muros de concreto reforzado y losas macizas por medio de un análisis elástico, siguiendo las recomendaciones establecidas en el Reglamento de Construcción Sismo Resistente del 2010, NSR-10. En la segunda etapa se evaluó el desempeño sísmico usando el método estático no lineal según ASCE/SEI 41-17 y finalmente se hizo retroalimentación del diseño basado en los resultados obtenidos del análisis no lineal, siguiendo las recomendaciones del ACI-318-19, encontrándose que cumple con los parámetros de seguridad establecidos tanto en el ASCE 41-17 como en la NSR-10. La evaluación realizada mediante el análisis estático no lineal, la estructura cumple con el objetivo de desempeño establecido, porque los desplazamientos obtenidos del análisis modal espectral son menores a los obtenidos por el método estático no lineal, por tanto, la estructura tiene más capacidad al desplazamiento que la estimada inicialmente. El desplazamiento objetivo que se encuentra graficado con los demás límites de desempeño se encuentra anterior al límite de ocupación inmediata (OI), denominado (S-3) según el ASCE 41-17 lo cual significa que la estructura para el sismo de diseño se mantiene con las mismas condiciones de capacidad y resistencia. No se presenta pérdidas de vidas humanas y la estructura funciona con normalidad. Se evidenció un aumento significativo de la demanda a cortante en algunos muros del sistema estructural según el análisis estático no lineal, de acuerdo a lo requerido por el ACI318-19 se reforzó los muros.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director: Edison Osorio Bustamante. Doctorado en Ingeniería de la Construcción.

Abstract

Title: Performance of a 12-story building designed with a structural system of seismic resistance (DES) of load-bearing walls in reinforced concrete using the non-linear static method.

Author: Abelardo Uribe Ramírez**

Keywords: Structural walls, shear walls, thin walls

Description:

Initially, the structural design of a 12 story building was carried out, consisting of a structural system of reinforced concrete walls and solid slabs by means of an elastic analysis, following the recommendations established in the 2010 Earthquake Resistant Construction Regulations, NSR-10. In the second stage, the seismic performance was evaluated using the non-linear static method according to ASCE / SEI 41-17 and finally, feedback of the design was made based on the results obtained from the non-linear analysis, following the recommendations of ACI-318-19, finding that complies with the security parameters established in both ASCE 41-17 and NSR-10. The evaluation carried out through the non-linear static analysis, the structure meets the established performance objective, because the displacements obtained from the spectral modal analysis are lower than those obtained by the non-linear static method, therefore, the structure has more capacity to displacement than initially estimated. The target displacement that is graphed with the other performance limits is prior to the immediate occupancy limit (OI), called (S-3) according to ASCE 41-17, which means that the structure for the design earthquake is maintained with the same capacity and resistance conditions. There is no loss of human life and the structure works normally. A significant increase in shear demand was evidenced in some walls of the structural system according to the nonlinear static analysis, as required by ACI318-19 the walls were reinforced.

** Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering Director: Edison Osorio Bustamante. PhD in Construction Engineering.

Introducción

En el sismo de Chile de febrero del 2010 se observaron daños estructurales en edificios de muros de concreto de altura media y alta, siendo muy bueno el comportamiento en general. Sin embargo, algunos edificios colapsaron como resultado del sismo (NIST, 2014). Los estudios demostraron que los daños ocurrieron en edificios construidos después del año 2000, probablemente contenían muros de espesores delgados diseñados con demandas de mayor esfuerzo axial que los diseñados en épocas anteriores (Segura & Wallace, 2018).

El presente proyecto de grado, desarrolló el estudio del comportamiento estructural de una edificación con sistema estructural de resistencia sísmica de muros de carga en concreto reforzado, ubicada en el Municipio de San José de Cúcuta Norte de Santander, zona de amenaza sísmica alta, utilizando el método de análisis dinámico elástico, de acuerdo con los requisitos del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 926, 2010), verificando su nivel de desempeño mediante el método de análisis del sistema de resistencia sísmica estático no lineal según la norma de evaluación sísmica y remodelación de edificios existentes ASCE/SEI 41-17 (ASCE/SEI41-17, 2017).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño sísmico usando el método estático no lineal según ASCE/SEI 41-17 (2017) de una edificación de 12 pisos diseñada de acuerdo a la NSR-10 (Decreto 926, 2010) con sistema estructural de resistencia sísmica de muros de carga en concreto reforzado tipo DES.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el diseño del sistema estructural de resistencia sísmica de muros de carga de concreto reforzado de una edificación de doce pisos, ubicada en zona de riesgo sísmico alto, mediante método de análisis del sistema de resistencia dinámico lineal elástico de acuerdo con los requisitos del NSR-10 (Decreto 926, 2010).
- Determinar las curvas de capacidad mediante el método de análisis del sistema de resistencia estático no lineal, según el ASCE/SEI 41-17 (2017), e identificar parámetros de desempeño sísmico, teniendo en cuenta la flexibilidad de la cimentación.
- Proponer ajustes al diseño inicial del edificio en función de su desempeño sísmico y recomendaciones del ACI 318-19 (ACI318, 2019).

2. Fase 1: Análisis y Diseño Elástico Lineal

El proyecto se divide en dos fases: En la primera se realiza un análisis modal espectral y en la segunda se realiza el análisis estático no-lineal, por último, se procede a analizar la información obtenida.

Estos pasos mencionados se muestran a continuación:

2.1 Fase 1: Análisis y Diseño Elástico Lineal

A continuación, se presenta la caracterización de la estructura, los materiales empleados, las cargas consideradas y el modelo matemático para el análisis estructural. Se verificarán los requisitos establecidos en la NSR-10. Por último, se realizará el diseño de los elementos que hacen parte del sistema principal de resistencia sísmica de la edificación.

Por tanto, se cumple con lo descrito en la NSR-10 Título A, Capítulo A.3, Tabla A.3-3, además se aclara que según el Artículo A.3.2.1 el sistema estructural de muros de concreto reforzado es el encargado de resistir las cargas verticales y horizontales.

2.2 Característica de la Estructura

El proyecto seleccionado se ubica en la ciudad de San José de Cúcuta, Norte de Santander, zona de amenaza sísmica alta. Consiste en un edificio de vivienda de 12 pisos con cuatro apartamentos por pisos (área aproximada por apartamento de 68 m²) con una altura máxima de 30.24 m. De

acuerdo al diseño arquitectónico el sistema estructural propuesto, consiste en muros de concreto reforzado. Se evalúa las alternativas de espesores de muros, buscando la menor afectación posible del diseño arquitectónico original. A continuación, se presentan los parámetros utilizados.

2.2.1 Concreto no confinado

En la Tabla 1 se define la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) utilizados en la modelación.

Tabla 1.

Resistencia a la compresión del concreto en elementos estructurales

| Elemento | Unidades | Valor | Descripción |
|-----------------|-----------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| Viga | N. A | N. A | N. A |
| Columna | N. A | N. A | N. A |
| Muros | MPa | 28 | Resistencia a la compresión del concreto no confinado |
| Losa entrepiso | MPa | 28 | Resistencia a la compresión del concreto no confinado |
| Losa cubierta | MPa | 28 | Resistencia a la compresión del concreto no confinado |
| Cimentación | MPa | 28 | Resistencia a la compresión del concreto no confinado |

Para el cálculo del módulo de elasticidad se usará la $3900\sqrt{f'_c}$ MPa. También se define que la máxima deformación a la compresión del concreto según la NSR-10 en la sección C.10.2.3 es $\epsilon_{uc} = 0.003$ y en el comentario CR.8.5.1 menciona que se puede utilizar un módulo de Poisson de 0.20 en caso de no contar con un valor experimental.

2.2.2 Acero de refuerzo

Según la NSR-10 en el Título C, Capítulo C.3, Artículo C.3.5.1 el refuerzo para los elementos estructurales debe ser acero corrugado de baja aleación de resistencia a la fluencia $F_y = 420$ MPa. El módulo de elasticidad según la NSR-10 Título C, Artículo C.8.5.2, para el acero estructural es $E_s = 200.000$ MPa.

Según la NSR-10 Título C, Capítulo C.3, Artículo 3.5.3.1 las barras de refuerzo corrugado de baja aleación deben cumplir con la Norma Técnica Colombiana (NTC) 2289 o en su defecto con la norma American Society for Testing and Materials (ASTM) 706 (Decreto 926, 2010).

2.3 Descripción del sistema estructural

El sistema estructural del presente proyecto está definido según la NSR-10 Título A, Capítulo A.3 Artículo A.3.2 como Muros de Carga. Este sistema será específicamente de concreto reforzado y según la NSR-10 Título A Capítulo A.3 Tabla 3-1 tiene un $R_o:5.0$ y $\Omega_o:2.5$.

Los aspectos principales del sistema estructural del proyecto y los elementos estructurales que lo componen se describen a continuación:

Sistema de resistencia sísmico: Muros de concreto reforzado.

Sistema de resistencia de cargas vertical: Muros de concreto reforzado.

Tipo de losa de entrepiso: Maciza armada en dos direcciones.

Tipo de losa de cubierta: Maciza armada en dos direcciones.

Tipo de cimentación: Losa de cimentación con vigas.

2.3.1 Dimensiones de los elementos estructurales

En la Figura 1 se presenta la distribución de muros en planta y los nombres utilizados, los muros sombreados de color rojo son de espesor de 0.15m y los de color blanco son de espesor de 0.20 m. En la Tabla 2 se presenta las dimensiones de los elementos estructurales de muros y losas que se utilizaron en el modelo matemático para cumplir los requisitos de deriva y diseño, cumpliendo con la NSR-10. Estas dimensiones son el producto del análisis basado en cargas de servicio y cargas sísmicas según considerando el coeficiente de capacidad de disipación de energía para diseño R y las cargas verticales.

Tabla 2.

Dimensiones de los elementos estructurales

| Elemento | Unidades | b* | h* | e** | L** | Descripción |
|------------------|----------|------|------|------|---------|------------------------------------|
| Muros | m | N.A. | N.A. | 0.15 | Variado | Dimensiones de muros estructurales |
| Muros | m | N.A. | N.A. | 0.20 | Variado | Dimensiones de muros estructurales |
| Losa de entepiso | m | N.A. | N.A. | 0.12 | N.A. | Espesor de la losa de entepiso |
| Losa de cubierta | m | N.A. | N.A. | 0.12 | N.A. | Espesor de la losa de cubierta |

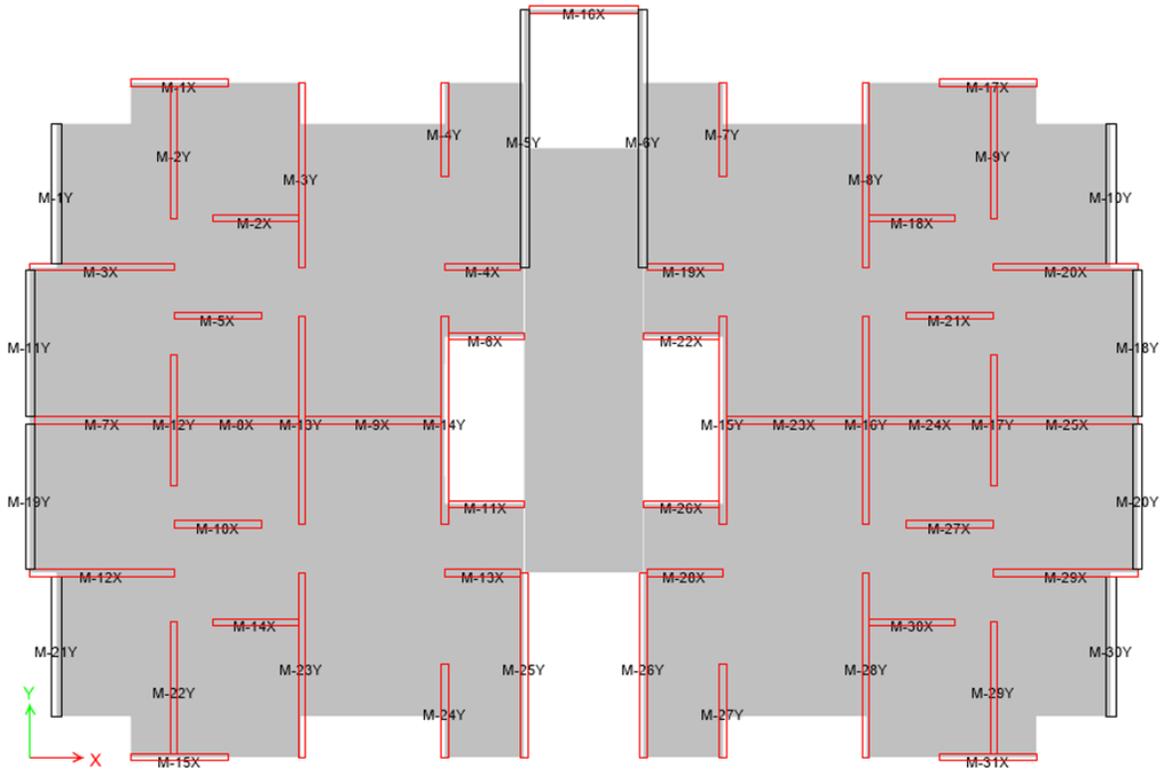
* Base (b) y altura (h) de vigas ó columnas

** Espesor (e) del muro estructural o losa

*** Longitud (l) de los muros estructurales

Figura 1.

Distribución y etiquetas de muros en planta



En la Tabla 3 se presentan las características geométricas de los muros de la Figura 1.

Tabla 3.*Propiedades geométricas de los muros del sistema de resistencia sísmica*

| Muros Direccion X | fc MPa | h m | Lw m | A m ² | Muros Direccion Y | fc MPa | h m | Lw m | A m ² |
|----------------------|-----------|--------|---------------|-----------------------|----------------------|-----------|--------|---------------|-----------------------|
| M-1X | 28 | 0.15 | 2.10 | 0.315 | M-1Y | 28 | 0.20 | 3.00 | 0.60 |
| M-2X | 28 | 0.15 | 1.85 | 0.278 | M-2Y | 28 | 0.15 | 2.85 | 0.43 |
| M-3X | 28 | 0.15 | 3.15 | 0.473 | M-3Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-4X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-4Y | 28 | 0.15 | 2.00 | 0.30 |
| M-5X | 28 | 0.15 | 1.90 | 0.285 | M-5Y | 28 | 0.20 | 6.00 | 1.20 |
| M-6X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-6Y | 28 | 0.20 | 6.00 | 1.20 |
| M-7X | 28 | 0.15 | 2.95 | 0.443 | M-7Y | 28 | 0.15 | 2.00 | 0.30 |
| M-8X | 28 | 0.15 | 2.60 | 0.390 | M-8Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-9X | 28 | 0.15 | 2.95 | 0.443 | M-9Y | 28 | 0.15 | 2.85 | 0.43 |
| M-10X | 28 | 0.15 | 1.90 | 0.285 | M-10Y | 28 | 0.20 | 3.00 | 0.60 |
| M-11X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-11Y | 28 | 0.20 | 3.10 | 0.62 |
| M-12X | 28 | 0.15 | 3.15 | 0.473 | M-12Y | 28 | 0.15 | 2.80 | 0.42 |
| M-13X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-13Y | 28 | 0.15 | 4.50 | 0.68 |
| M-14X | 28 | 0.15 | 1.85 | 0.278 | M-14Y | 28 | 0.15 | 4.50 | 0.68 |
| M-15X | 28 | 0.15 | 2.10 | 0.315 | M-15Y | 28 | 0.15 | 4.50 | 0.68 |
| M-16X | 28 | 0.15 | 2.40 | 0.360 | M-16Y | 28 | 0.15 | 4.50 | 0.68 |
| M-17X | 28 | 0.15 | 2.10 | 0.315 | M-17Y | 28 | 0.15 | 2.80 | 0.42 |
| M-18X | 28 | 0.15 | 1.85 | 0.278 | M-18Y | 28 | 0.20 | 3.10 | 0.62 |
| M-19X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-19Y | 28 | 0.20 | 3.10 | 0.62 |
| M-20X | 28 | 0.15 | 3.15 | 0.473 | M-20Y | 28 | 0.20 | 3.10 | 0.62 |
| M-21X | 28 | 0.15 | 1.90 | 0.285 | M-21Y | 28 | 0.20 | 3.00 | 0.60 |
| M-22X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-22Y | 28 | 0.20 | 2.85 | 0.57 |
| M-23X | 28 | 0.15 | 2.95 | 0.443 | M-23Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-24X | 28 | 0.15 | 2.60 | 0.390 | M-24Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-25X | 28 | 0.15 | 2.95 | 0.443 | M-25Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-26X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-26Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-27X | 28 | 0.15 | 1.90 | 0.285 | M-27Y | 28 | 0.15 | 2.00 | 0.30 |
| M-28X | 28 | 0.15 | 1.65 | 0.248 | M-28Y | 28 | 0.15 | 4.00 | 0.60 |
| M-29X | 28 | 0.15 | 3.15 | 0.473 | M-29Y | 28 | 0.15 | 2.85 | 0.43 |
| M-30X | 28 | 0.15 | 1.85 | 0.278 | M-30Y | 28 | 0.20 | 3.00 | 0.60 |
| M-31X | 28 | 0.15 | 2.10 | 0.315 | | | | | |
| | | | Área muros X | 10.29 m ² | | | | Área muros Y | 17.77 m ² |
| | | | Área de placa | 406.40 m ² | | | | Área de placa | 406.40 m ² |
| | | | % Muros X | 2.53% | | | | % Muros Y | 4.37% |

2.3.2 Localización de la estructura

La edificación está ubicada en el área metropolitana de San José de Cúcuta, que según la NSR-10 Título A, Capítulo A.2, Tabla A.2.3-2, se encuentra en una zona de amenaza sísmica alta con valores de A_a y A_v de 0.35 y 0.30 respectivamente.

2.3.3 Capacidad de disipación de energía

En el Título A de la NSR-10, Capítulo A.3, Tabla A.3-3 menciona que el sistema Muros de Carga de concreto reforzado está permitido en zonas de amenaza sísmica alta, pero debe diseñarse cumpliendo los requisitos de disipación de energía especial (DES) y tiene un límite de altura de 50m por lo tanto este proyecto cumple con la altura establecida según la NSR-10.

2.3.4 Consideraciones de resistencia contra el fuego

Según la NSR-10 Título J, Capítulo J-1, Artículo J.1.1.1 toda edificación deberá cumplir con los requisitos mínimos de protección contra incendios correspondientes al uso de la edificación y su grupo de ocupación. En la NSR-10 Título J, Capítulo J-1, Tabla J.1.1-1 clasifica como subgrupo tipo R-2 a los edificios multifamiliares. Según la clasificación de la NSR-10 Título J, Capítulo J-3, Artículo J.3.3, la edificación pertenece a la categoría 1, que corresponde a edificaciones con mayores riesgos de pérdidas de vida humanas. Se verifica en la NSR-10 Título J, Capítulo J-3, Tabla J.3.4-3 que para la categoría 1 se requiere que losas y muros de la edificación tengan una resistencia requerida al fuego de 2 horas. Se revisan las limitaciones del recubrimiento mínimo en losas de concreto reforzado en función de la resistencia requerida al fuego en horas en la NSR-10 Título J, Capítulo J-3, Tabla J.3.5-3. El recubrimiento puede ser de 20mm, pero el tipo de agregado debe ser carbonatado, liviano o silíceo; la condición de expansión selecciona es no restringida del fuego. El espesor mínimo de muros y losas debe ser 120mm según la NSR-10, Capítulo J-3, Tabla J.3.5-2.

2.3.5 Datos del estudio geotécnico

En la Tabla 4 se resumen los parámetros sísmicos y geotécnicos de la zona donde se proyecta la edificación.

Tabla 4.

Parámetros geotécnicos

| Características | Unidades | Descripción | Descripción |
|-----------------|--------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Clasificación | [-] | C | Tipo de suelo |
| A_a | [-] | 0.35 | Aceleración horizontal pico efectiva para diseño |
| A_v | [-] | 0.30 | Velocidad horizontal pico efectiva para diseño |
| F_a | [-] | 1.05 | Coefficiente de amplificación para la zona de periodos cortos, Artículo A.2.4.5.5 de la NSR-10 |
| F_v | [-] | 1.50 | Coefficiente de amplificación para la zona de periodos intermedios, Artículo A.2.4.5.6 de la NSR-10 |
| I | [-] | 1.00 | Coefficiente de importancia, Artículo A.2.5.2 de la NSR-10 |
| σ | kN/m ³ | 1.70 | Densidad del suelo |
| K_s | kg/cm ³ | 1.00 | Modulo de reaccion del suelo |
| q_s | kN/m ² | 300 | Esfuerzo admisible de suelo |

2.4 Análisis de irregularidades en planta

A continuación, se resume la evaluación de las irregularidades que se deben revisar según la NSR-10.

2.4.1 Irregularidad torsional, Tipo 1aP

Se presenta en la Tabla 5 la evaluación de este tipo de irregularidad, según los resultados, no se presenta este tipo de irregularidad en la estructura $\phi_p=1$.

Tabla 5.*Evaluación de irregularidad torsional tipo 1aP en X y Y*

| X | | | | Y | | | | | |
|------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Piso | Máximo $\Delta 1$ | Máximo $\Delta 2$ | Promedio $(\Delta 1 + \Delta 2) / 2$ | Relación $\Delta 1 / \text{Promedio}$ | Piso | Máximo $\Delta 1$ | Máximo $\Delta 2$ | Promedio $(\Delta 1 + \Delta 2) / 2$ | Relación $\Delta 1 / \text{Promedio}$ |
| 12 | 0.20% | 0.17% | 0.18% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 12 | 0.19% | 0.22% | 0.20% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 11 | 0.21% | 0.19% | 0.20% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 11 | 0.20% | 0.23% | 0.21% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 10 | 0.23% | 0.20% | 0.22% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 10 | 0.21% | 0.24% | 0.22% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 9 | 0.24% | 0.22% | 0.23% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 9 | 0.21% | 0.24% | 0.23% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 8 | 0.26% | 0.23% | 0.24% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 8 | 0.22% | 0.25% | 0.23% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 7 | 0.26% | 0.24% | 0.25% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 7 | 0.21% | 0.25% | 0.23% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 6 | 0.26% | 0.24% | 0.25% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 6 | 0.21% | 0.24% | 0.22% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 5 | 0.26% | 0.23% | 0.25% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 5 | 0.19% | 0.23% | 0.21% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 4 | 0.24% | 0.22% | 0.23% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 4 | 0.17% | 0.21% | 0.19% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 3 | 0.22% | 0.20% | 0.21% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 3 | 0.15% | 0.18% | 0.16% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 2 | 0.18% | 0.16% | 0.17% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 2 | 0.11% | 0.13% | 0.12% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |
| 1 | 0.10% | 0.09% | 0.09% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ | 1 | 0.05% | 0.07% | 0.06% | <1.2 ; $\Phi_p = 1$ |

2.4.2 Irregularidad torsional extrema, Tipo 1bP

Como se aprecia en la Tabla 5 las derivas no superan 1.4 veces el promedio por tanto no se presentan este tipo de irregularidad $\phi_p=1$.

2.4.3 Irregularidad por retrocesos en las esquinas, Tipo 2P

La configuración de una estructura se considera irregular cuando ésta tiene retrocesos en sus esquinas. Un retroceso es un esquina se considera excesivo cuando las proyecciones de la estructura, a ambos lados del retroceso son mayores que el 15 por ciento de la dimensión de la planta de la estructura en la dirección del retroceso. No se presenta este tipo de irregularidad, ver la Figura 1, por tanto, el valor será $\phi_p=1.0$

2.4.4 Irregularidad por discontinuidades en el diafragma, Tipo 3P

No se presenta este tipo de irregularidad, por tanto, el valor será $\phi_p=1.0$

2.4.5 Irregularidad por retrocesos desplazamientos de los planos de acción, Tipo 4p

Todos los elementos que se encargan de la transferencia de las cargas gravitacionales y sísmicas son continuos desde la cimentación hasta la cubierta de la estructura, por tanto, no se presenta este tipo de irregularidad $\phi_p=1.0$

2.5 Análisis de irregularidades en altura

Se evaluaron las irregularidades en altura (ϕ_a) según lo establecido en el Capítulo A.3, Tabla A.3-7. Según el Capítulo A.3, Artículo A.3.3.5.1 “Cuando para todos los pisos, la deriva de cualquier piso es menor 1.3 veces la deriva del piso siguiente hacia arriba, puede considerarse que no existen irregularidades en altura de los tipos 1aA, 1bA, 2A y 3A” y por tanto se aplica $\phi_a=1$. Se revisan las irregularidades en altura de acuerdo a la Figura A.3.2 – Irregularidades en altura del NSR-10 tipo 4A desplazamiento en el plano de acción, Tipo 5aA piso débil, Tipo 5bA piso débil extremo, cuyas irregularidades no se presentan para este modelo. $\phi_a=1$, como se ilustra en la Tabla 6.

Tabla 6.*Deriva del piso i sobre la deriva del piso i+1*

| Piso | $\Delta i/\Delta i+1$ | |
|------|------------------------------------|------------------------------------|
| | $\Delta(\text{Fza. sismica en X})$ | $\Delta(\text{Fza. sismica en Y})$ |
| 12 | N/A | N/A |
| 11 | 0.926 | 0.909 |
| 10 | 0.914 | 0.896 |
| 9 | 0.898 | 0.880 |
| 8 | 0.878 | 0.860 |
| 7 | 0.855 | 0.835 |
| 6 | 0.826 | 0.805 |
| 5 | 0.789 | 0.766 |
| 4 | 0.739 | 0.713 |
| 3 | 0.668 | 0.639 |
| 2 | 0.555 | 0.526 |
| 1 | 0.352 | 0.332 |

2.6 Análisis de irregularidad por ausencia de redundancia

Siendo una estructura nueva se busca proveer redundancia a la estructura con el fin de mantener la capacidad de disipación de energía aún si pierde algún muro estructural, ó de una porción de él que tenga una relación de la altura del piso a su longitud horizontal mayor que la unidad, según el Capítulo A.3, Artículo A.3.3.8.2 de la NSR-10, si no resulta en una reducción de más del 33 por ciento ante fuerzas horizontales del piso. Para verificar el cumplimiento, se redujo la capacidad a cortante de los muros en el primer nivel, en X se redujo el muro M-3X y en la dirección Y se redujo la capacidad al muro M-20Y. En la Tabla 7 se puede ver la relación de la capacidad a cortante del muro fisurado respecto al muro sin fisurar en la dirección X y Y. Los resultados muestran que los muros redujeron su capacidad a cortante menor al 33% por tanto, se toma $\phi_r=1$.

Tabla 7.

Resultados del aumento de solicitud por cortante de los muros en dirección X y Y, después de la reducción de la capacidad del muro M-3X y M-20Y

| Muros | V2* | | V2** | | |
|-------|----------|-------|----------|--------|-------------|
| | kN | % V2* | kN | % V2** | %V2*- %V2** |
| M-1X | 600.09 | 1.76% | 638.78 | 1.87% | 0.11% |
| M-2X | 707.84 | 2.07% | 742.77 | 2.17% | 0.10% |
| M-3X | 1494.50 | 4.37% | 354.13 | 1.04% | -3.34% |
| M-4X | 622.49 | 1.82% | 653.58 | 1.91% | 0.09% |
| M-5X | 262.78 | 0.77% | 276.35 | 0.81% | 0.04% |
| M-6X | 667.76 | 1.95% | 698.28 | 2.04% | 0.09% |
| M-7X | 2478.25 | 7.25% | 2541.89 | 7.44% | 0.19% |
| M-8X | 2481.27 | 7.26% | 2543.11 | 7.44% | 0.18% |
| M-9X | 2617.24 | 7.66% | 2684.57 | 7.86% | 0.20% |
| M-10X | 273.12 | 0.80% | 286.81 | 0.84% | 0.04% |
| M-11X | 682.82 | 2.00% | 710.09 | 2.08% | 0.08% |
| M-12X | 1614.85 | 4.73% | 1670.71 | 4.89% | 0.16% |
| M-13X | 444.01 | 1.30% | 467.85 | 1.37% | 0.07% |
| M-14X | 746.64 | 2.18% | 774.72 | 2.27% | 0.08% |
| M-15X | 653.58 | 1.91% | 680.03 | 1.99% | 0.08% |
| M-16X | 1246.73 | 3.65% | 1303.30 | 3.81% | 0.17% |
| M-17X | 600.11 | 1.76% | 638.83 | 1.87% | 0.11% |
| M-18X | 707.87 | 2.07% | 743.42 | 2.18% | 0.10% |
| M-19X | 624.15 | 1.83% | 654.81 | 1.92% | 0.09% |
| M-20X | 1486.20 | 4.35% | 1554.94 | 4.55% | 0.20% |
| M-21X | 262.98 | 0.77% | 278.45 | 0.81% | 0.05% |
| M-22X | 669.06 | 1.96% | 699.29 | 2.05% | 0.09% |
| M-23X | 2625.69 | 7.68% | 2693.03 | 7.88% | 0.20% |
| M-24X | 2503.54 | 7.33% | 2564.68 | 7.50% | 0.18% |
| M-25X | 2694.31 | 7.88% | 2764.25 | 8.09% | 0.20% |
| M-26X | 682.23 | 2.00% | 709.78 | 2.08% | 0.08% |
| M-27X | 273.41 | 0.80% | 287.11 | 0.84% | 0.04% |
| M-28X | 443.40 | 1.30% | 467.40 | 1.37% | 0.07% |
| M-29X | 1606.91 | 4.70% | 1663.10 | 4.87% | 0.16% |
| M-30X | 746.19 | 2.18% | 774.39 | 2.27% | 0.08% |
| M-31X | 653.40 | 1.91% | 679.90 | 1.99% | 0.08% |
| sumas | 34173.40 | 100% | 34200.39 | 100% | |

| Muros | V2* | | V2** | | |
|-------|----------|-------|----------|--------|-------------|
| | kN | % V2* | kN | % V2** | %V2*- %V2** |
| M-1Y | 1352.28 | 4.10% | 1294.61 | 3.93% | -0.18% |
| M-2Y | 819.11 | 2.49% | 797.61 | 2.42% | -0.07% |
| M-3Y | 1102.71 | 3.35% | 1100.45 | 3.34% | -0.01% |
| M-4Y | 132.08 | 0.40% | 138.24 | 0.42% | 0.02% |
| M-5Y | 2673.54 | 8.12% | 2764.83 | 8.39% | 0.28% |
| M-6Y | 2530.80 | 7.68% | 2688.86 | 8.16% | 0.48% |
| M-7Y | 125.60 | 0.38% | 144.06 | 0.44% | 0.06% |
| M-8Y | 981.31 | 2.98% | 1103.98 | 3.35% | 0.37% |
| M-9Y | 695.21 | 2.11% | 802.60 | 2.44% | 0.33% |
| M-10Y | 1105.45 | 3.36% | 1289.95 | 3.92% | 0.56% |
| M-11Y | 1986.91 | 6.03% | 1911.80 | 5.80% | -0.23% |
| M-12Y | 622.84 | 1.89% | 604.35 | 1.83% | -0.06% |
| M-13Y | 1350.58 | 4.10% | 1349.01 | 4.09% | 0.00% |
| M-14Y | 1535.62 | 4.66% | 1570.11 | 4.77% | 0.10% |
| M-15Y | 1442.67 | 4.38% | 1554.20 | 4.72% | 0.34% |
| M-16Y | 1210.73 | 3.68% | 1352.46 | 4.11% | 0.43% |
| M-17Y | 529.63 | 1.61% | 622.64 | 1.89% | 0.28% |
| M-18Y | 1763.54 | 5.35% | 1942.49 | 5.90% | 0.54% |
| M-19Y | 1989.86 | 6.04% | 1914.24 | 5.81% | -0.23% |
| M-20Y | 1764.49 | 5.36% | 435.07 | 1.32% | -4.04% |
| M-21Y | 1354.35 | 4.11% | 1296.82 | 3.94% | -0.17% |
| M-22Y | 819.05 | 2.49% | 797.47 | 2.42% | -0.07% |
| M-23Y | 1102.26 | 3.35% | 1099.81 | 3.34% | -0.01% |
| M-24Y | 134.14 | 0.41% | 140.31 | 0.43% | 0.02% |
| M-25Y | 460.12 | 1.40% | 482.86 | 1.47% | 0.07% |
| M-26Y | 447.99 | 1.36% | 485.82 | 1.47% | 0.11% |
| M-27Y | 127.47 | 0.39% | 145.89 | 0.44% | 0.06% |
| M-28Y | 983.50 | 2.99% | 1106.38 | 3.36% | 0.37% |
| M-29Y | 695.70 | 2.11% | 804.22 | 2.44% | 0.33% |
| M-30Y | 1104.16 | 3.35% | 1252.34 | 3.80% | 0.45% |
| sumas | 32943.68 | 100% | 32993.46 | 100% | |

* Fuerza cortante en muros sin fisurar

** Fuerza cortante en muros con fisuración en muro M-3X

* Fuerza cortante en muros sin fisurar

** Fuerza cortante en muros con fisuración en muro M-20Y

2.7 Evaluación de cargas

En la Tabla 8, se describen los tipos y los valores de cargas que se utilizaron, siguiendo los parámetros del Capítulo B del NSR-10.

Tabla 8.*Evaluación de cargas del proyecto*

| TIPO DE CARGA | | DESCRIPCIÓN | DENSIDAD (kN/m ³) | CARGA (kN/m ²) |
|---------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| Estructurales | Peso propio | Muros | 24.0 | |
| | Peso propio | Losa de entrepiso e= 120 mm | 24.0 | 2.88 |
| MUERTA | No - estructurales | Afinado de piso | | 1.5 |
| | | Enchape de piso | | 1.1 |
| | | Muros de mampostería inc. pañetes | 13.0 | |
| VIVA | Residencial | Cuartos y corredores | | 1.8 |
| | | Escaleras | | 3.0 |
| | | Cubierta | | 1.8 |

2.8 Fuerzas sísmicas de diseño

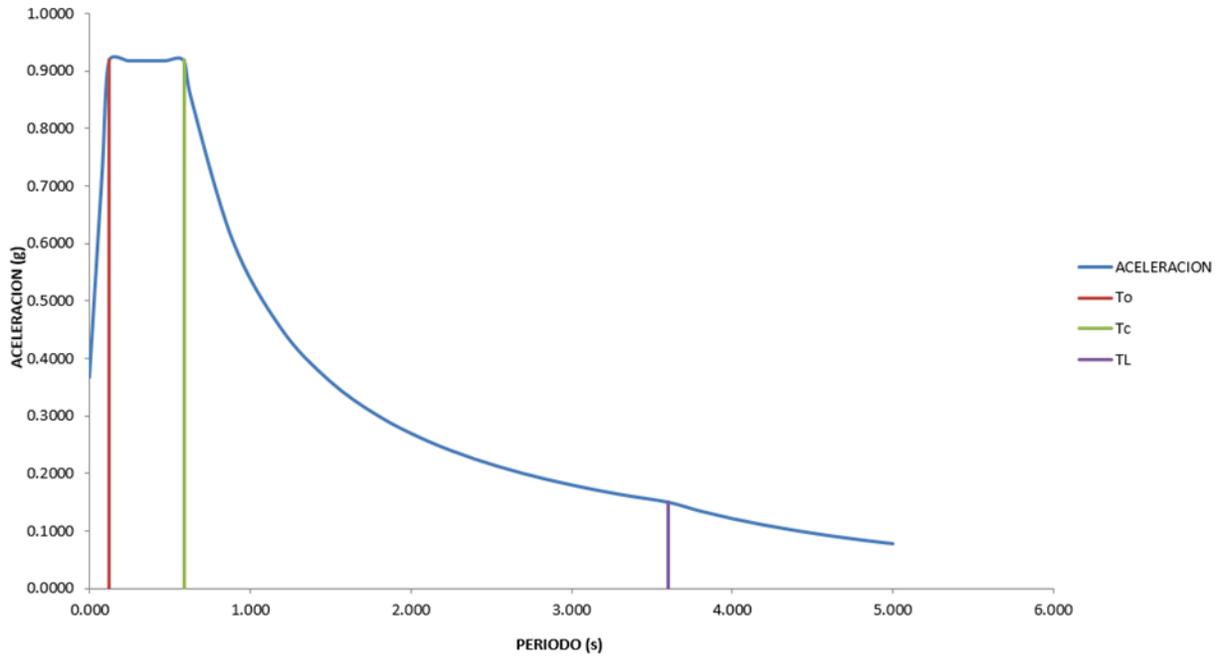
Las fuerzas sísmicas se calcularon con el método de análisis modal espectral realizando el ajuste del cortante basal según lo requerido según el Título, Capítulo A.5, Artículo 5.4.5. En la Tabla 10 se observa los cálculos.

2.8.1 Espectro elástico de aceleración

Las fuerzas sísmicas se calcularon con el espectro elástico construido a partir de las expresiones plasmadas en el Título A, Capítulo A.2, Artículo A.2.6 de la NSR-10. Los parámetros para la construcción del espectro son los plasmados en la Tabla 4, considerando un coeficiente de importancia igual a 1, en la Figura 2 se observa la gráfica del espectro elástico de diseño.

Figura 2.

Espectro elástico de aceleración de diseño como fracción de g



2.8.2 Masa de la estructura

La masa de cada piso se calculará conforme a la definición del Capítulo A.3. del NSR-10, de tal manera que todo el peso propio y toda la carga muerta adicional al peso propio constituye una fuente de masa, en la Tabla 9 se observa el valor del peso total de la estructura.

Tabla 9.

Peso total de la estructura

| Peso total de la estructura | | |
|-----------------------------|----|----------|
| W | kN | 42744.13 |

2.8.3 Cálculo de la fuerza horizontal equivalente

Se determinó el cortante en la base según el Capítulo A.4 del NSR-10, utilizando los parámetros geotécnicos, el espectro elástico de aceleración, la masa de la edificación y el periodo fundamental aproximado para cada dirección principal del sistema estructural como se detalla en la Tabla 10.

Tabla 10.

Parámetros sísmicos y ajuste del cortante en la base

| Análisis | Unid. | Dirección | |
|-------------------------------------|-------|-----------|----------|
| | | X | Y |
| Zona de amenaza sísmica: | N.A | | Alta |
| Aa(NSR-10 tabla A.2.3-2): | g | | 0.35 |
| Av(NSR-10 tabla A.2.3-2): | g | | 0.30 |
| Fa(NSR-10 tabla A.2.4-3): | N.A | | 1.05 |
| Fv(NSR-10 tabla A.2.4-4): | N.A | | 1.50 |
| I(NSR-10 A.2.5): | N.A | | 1 |
| Ct(NSR-10 tabla A.4.2-1): | N.A | | 0.049 |
| α (NSR--10 tabla A.4.2-1): | N.A | | 0.75 |
| h | m | | 30.24 |
| W | kN | | 42744.13 |
| Cu(NSR-10 A.4.2.1): | N.A | | 1.2 |
| Tmodal: | s | 0.399 | 0.374 |
| Cu*Ta(NSR-10 A.4.2.2): | s | 0.765 | 0.765 |
| K(NSR-10 A.4.3.2): | N.A | 1.0 | 1.0 |
| Mín(CuTa, T modal) (NSR-10 A.4.2.1) | s | 0.399 | 0.374 |
| Sa(NSR-10 Tabla A.2.6): | N.A | 0.918 | 0.918 |
| Vs FHE(NSR-10 A.4.3.2): | kN | 39239.11 | 39239.11 |
| Vs Dinámico: | kN | 35246.39 | 34170.09 |
| Tipo de estructura | N.A | Regular | Regular |
| Ajuste Vs (NSR-10 A.5.4.5) | N.A | Cumple | Cumple |

2.9 Modelos de análisis y resultados

Los modelo empleado para el análisis y diseño elástico de la estructura se describen a continuación:

2.9.1 Modelo 1

Este modelo matemático posee la ubicación de los muros estructurales y los límites de la losa de entrepiso presentados en la Figura 1, utilizado para el diseño elástico lineal de los muros estructurales mediante un análisis modal espectral, verificando de manera previa el cumplimiento de los desplazamientos descritos en el Título A, Artículo A.6 de la NSR-10 y haciendo la reducción de las fuerzas elásticas con el coeficiente de capacidad de reducción de energía R según el Título A, Artículo A.3.7 de la NSR-10.

2.9.2 Modelo 2

Este modelo de análisis se enfatiza en encontrar los resultados para las cargas gravitacionales asignadas a la losa de entrepiso, con la finalidad de diseñar este elemento a flexión y cortante, además de verificar las deflexiones máximas permitidas según el Título C, Artículo C.9.5 de la NSR-10.

2.9.3 Modelo 3

Este modelo matemático tiene las características geométricas y la reducción de rigidez a flexión fuera del plano de los muros estructurales, se utilizó para el diseño de la cimentación asumiendo una distribución lineal de presiones en la interface de contacto cimentación-suelo. Se verifican esfuerzos admisibles, diseño a flexión y diseño a cortante de los elementos que componen la cimentación del proyecto.

2.10 Resultados del análisis

2.10.1 Análisis modal

El análisis se realizó con el método dinámico elástico, la respuesta se obtuvo utilizando el método CQC (Complete Quadratic Combination) basado en la demanda presentada en el espectro elástico de diseño de la Figura 1.

Según el Capítulo A.5, Artículo A.5.4.2 de NSR-10 deben “incluirse en el análisis todos los modos de vibración que contribuyan de manera significativa a la respuesta dinámica de la estructura y se considerará que se ha cumplido este requisito cuando se demuestre que, con el número de modos empleados se ha incluido en el cálculo de la respuesta de cada una de las direcciones horizontales por lo menos el 90 por ciento de la masa participante de la estructura”. Como se puede ver en la Tabla 11 se obtiene un porcentaje del 90% utilizando los 15 primeros modos de vibración.

Tabla 11.

Período y porcentaje de participación

| Mode | Period sec | UX | UY | RZ | Sum UX | Sum UY |
|------|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 1 | 0.686 | 71.4% | 0.0% | 0.3% | 71.4% | 0.0% |
| 2 | 0.65 | 0.1% | 67.6% | 0.5% | 71.5% | 67.7% |
| 3 | 0.53 | 0.3% | 0.4% | 68.7% | 71.8% | 68.1% |
| 4 | 0.195 | 16.4% | 0.0% | 0.0% | 88.1% | 68.1% |
| 5 | 0.164 | 0.0% | 17.7% | 0.5% | 88.2% | 85.8% |
| 6 | 0.154 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 7 | 0.152 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 8 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 9 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 10 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 11 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 12 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 88.2% | 85.8% |
| 13 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 90.2% | 90.4% |
| 14 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 91.8% | 91.6% |
| 15 | 0.151 | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 93.2% | 92.1% |

2.10.2 Desplazamiento máximo de piso

Se presentan los resultados de desplazamiento máximo por piso en la Tabla 12 para los casos de combinación modal espectral, incluyendo coordenadas en planta del nodo en que se midió el máximo desplazamiento, también se incluye el desplazamiento ortogonal correspondiente. Como se indicó anteriormente los valores se determinaron para cada modo de vibración y se combinaron usando CQC (Complete Quadratic Combination).

Tabla 12.

Desplazamiento máximo de piso

| PISO | Ubicación nodo | | Deriva X | | Deriva Y | |
|-------|----------------|------|----------|-------|----------|-------|
| | x | y | Dx | Dy | Dx | Dy |
| Unid. | m | m | mm | mm | mm | mm |
| 12 | 10.75 | 9.14 | 60.37 | 6.14 | 3.279 | 53.15 |
| 11 | 10.75 | 9.14 | 56.05 | 5.577 | 3.059 | 48.32 |
| 10 | 10.75 | 9.14 | 51.33 | 4.994 | 2.816 | 43.3 |
| 9 | 10.75 | 9.14 | 46.18 | 4.391 | 2.545 | 38.1 |
| 8 | 10.75 | 9.14 | 40.65 | 3.774 | 2.248 | 32.75 |
| 7 | 10.75 | 9.14 | 34.81 | 3.154 | 1.93 | 27.34 |
| 6 | 10.75 | 9.14 | 28.80 | 2.541 | 1.596 | 21.98 |
| 5 | 10.75 | 9.14 | 22.74 | 1.951 | 1.256 | 16.81 |
| 4 | 10.75 | 9.14 | 16.82 | 1.398 | 0.921 | 11.96 |
| 3 | 10.75 | 9.14 | 11.23 | 0.901 | 0.605 | 7.623 |
| 2 | 10.75 | 9.14 | 6.24 | 0.48 | 0.325 | 3.994 |
| 1 | 10.75 | 9.14 | 2.20 | 0.161 | 0.108 | 1.319 |

2.10.3 Análisis de la deriva

Se verificó que el modelo realizado cumple con el límite de la deriva establecido en el Capítulo A.6, Artículo A.6.4 de la NSR-10. Además, según los datos presentados en la Tabla 12

se puede verificar que la dirección Y es mucho más rígida que la dirección X debido a su densidad de muros.

En la Tabla 13 se presentan los resultados máximos con lo cual se puede verificar que en ningún caso la deriva total es superior al 1% de la altura total de piso.

Tabla 13.

Análisis de la deriva por fuerzas sísmicas

| Piso | Deriva de piso | |
|-------|----------------|------------|
| | Δx | Δy |
| Unid. | % | % |
| 12 | 0,17% | 0,19% |
| 11 | 0,19% | 0,20% |
| 10 | 0,20% | 0,21% |
| 9 | 0,22% | 0,21% |
| 8 | 0,23% | 0,21% |
| 7 | 0,24% | 0,21% |
| 6 | 0,24% | 0,21% |
| 5 | 0,24% | 0,19% |
| 4 | 0,22% | 0,17% |
| 3 | 0,20% | 0,14% |
| 2 | 0,16% | 0,11% |
| 1 | 0,09% | 0,05% |

La deriva se verificó según la Tabla 13, por tanto, la estructura cumple con el límite de deriva establecido en el Capítulo A.6, Artículo A.6.4 de la NSR-10.

3. Diseño

3.1 Combinaciones de diseño

En el Capítulo A.3, Tabla A.3-1 del NSR-10, para el sistema estructural de muros de carga con capacidad especial de disipación de energía se tienen los siguientes valores, $R_o = 5$ y $\Omega_o = 2.5$; que con los resultados obtenidos con el análisis de irregularidades del proyecto se podrá definir el coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño siendo $R = R_o * \phi_a * \phi_p * \phi_r = 5.0 * 1.0 * 1.0 * 1.0 = 5.0$.

Para el proceso de diseño de los elementos estructurales se usarán las fuerzas obtenidas de las combinaciones de carga establecidas en el Título B, Capítulo B.2, Artículo B.2.4.2 del NSR-10, presentadas en la Tabla 14. No se consideraron los efectos ortogonales en el diseño de los muros ya que su sección fuera del plano se fisuró para que no tomara carga en el lado débil de muro.

Tabla 14.

Combinaciones de diseño

| COMBOS | Dead | Live | Ex | Ey |
|---------------------|------|------|----|----|
| Comb1=1.4D | 1.4 | 0 | 0 | 0 |
| Comb2=1.2D + 1.6L | 1.2 | 1.6 | 0 | 0 |
| Comb3=1.2D + L + Ex | 1.2 | 1 | 1 | 0 |
| Comb4=1.2D + L - Ex | 1.2 | 1 | -1 | 0 |
| Comb5=1.2D + L + Ey | 1.2 | 1 | 0 | 1 |
| Comb6=1.2D + L - Ey | 1.2 | 1 | 0 | -1 |
| Comb7=0.9D + Ex | 0.9 | 0 | 1 | 0 |
| Comb8=0.9D - Ex | 0.9 | 0 | -1 | 0 |
| Comb9=0.9D + Ey | 0.9 | 0 | 0 | 1 |
| Comb10=0.9D - Ey | 0.9 | 0 | 0 | -1 |

3.2 Diseño losa de entrepiso

El diseño de la losa de entrepiso se realizó utilizando el modelo 2 descrito en la Sección 3.9.2 del presente documento considerando las combinaciones de cargas gravitacionales mayoradas.

Las propiedades de los materiales utilizados en el diseño de la losa de entrepiso se encuentran en la Tabla 15.

Tabla 15.

Propiedades de los materiales utilizados en el diseño de la losa de entrepiso

| Características | Unidades | Descripcion | Comentario |
|----------------------|----------|-------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Concreto | MPa | 28 | Resistencia a la compresion del concreto |
| E_c | MPa | 24870.06 | Modulo de elasticidad del concreto, Articulo C.8.5.1 de la NSR-10 |
| Acero | MPa | 420 | Resistencia a la fluencia del acero, Articulo C.3.5.1 de la NSR-10 |
| E_s | MPa | 200,000 | Modulo de elasticidad del acero, Articulo C.8.5.2 de la NSR-10 |
| Malla electrosoldada | MPa | 485 | Resistencia a la fluencia de la malla, Articulo CR.3.5.3.7 de la NSR-10 |
| E_s | MPa | 200,000 | Modulo de elasticidad de la malla, Articulo C.8.5.2 de la NSR-10 |

Se aplican los requisitos expuestos en el Capítulo C.7, Artículo C.7.7 del NSR-10. La losa será de concreto expuesto a la intemperie, por tanto, el recubrimiento deberá ser mínimo de 20 mm cumpliendo con los descrito en el Título C, Capítulo C.7, Articulo C.7.7.8 y requisito mínimo de protección contra el fuego.

3.2.1 Revisión del espesor de la losa por deflexiones

El cálculo del espesor de la losa se realizó a partir del control de las deflexiones causadas por las cargas vivas y permanentes inmediatas según la Tabla C.9.5(b) de la NSR-10. Se calculó la deflexión a largo plazo, los resultados se presentan en la Tabla 16. El espesor propuesto de 120

mm cumple con el límite de la deformación máxima permitida, $L/480$, descrita en la Tabla C.9.5(b) de la NSR-10.

Tabla 16.

Deflexiones inmediatas y a largo plazo

| | Unidades | Parametros |
|-------------------------------|-----------------|------------------------|
| Espesor propuesto | m | 0.12 |
| Luz | m | 4.00 |
| Recubrimiento | mm | 20 |
| As- (Superior) | [-] | Malla ele. 15x15 Ø 6mm |
| As+ (Inferior) | [-] | Malla ele. 15x15 Ø 6mm |
| Δ inmediata* | mm | 1.05 |
| Δ inmediata** | mm | 4.9 |
| ξ | [-] | 1.4 |
| ρ' (Cuantía de refuerzo) | [-] | 0.0018 |
| $\lambda\Delta$ | [-] | 1.28 |
| Δ Total*** | mm | 7.3 |
| Límite Δ | mm | 8.3 |

Diseño a flexión losa de entrepiso

El diseño de la losa de entrepiso por cargas gravitacionales mayoradas se presenta en la Tabla 17, basado en los momentos M11 y M22 de las Figuras 3 y 4. La capacidad a flexión por cuantía mínima es de 6.96 kN-m/m. Se observa en las Figuras 3 y 4 que las solicitaciones no superan este valor. Las verificaciones presentadas en la Tabla 16 corresponden a los requerimientos del Título C.7.12.2.1 de la NSR-10, cumpliendo con lo descrito en el Título C, Capítulo C.10, Artículo C.10.5.1 con respecto a la cantidad de refuerzo por flexión.

Figura 3.

Resultados momentos M11 kN-m/m

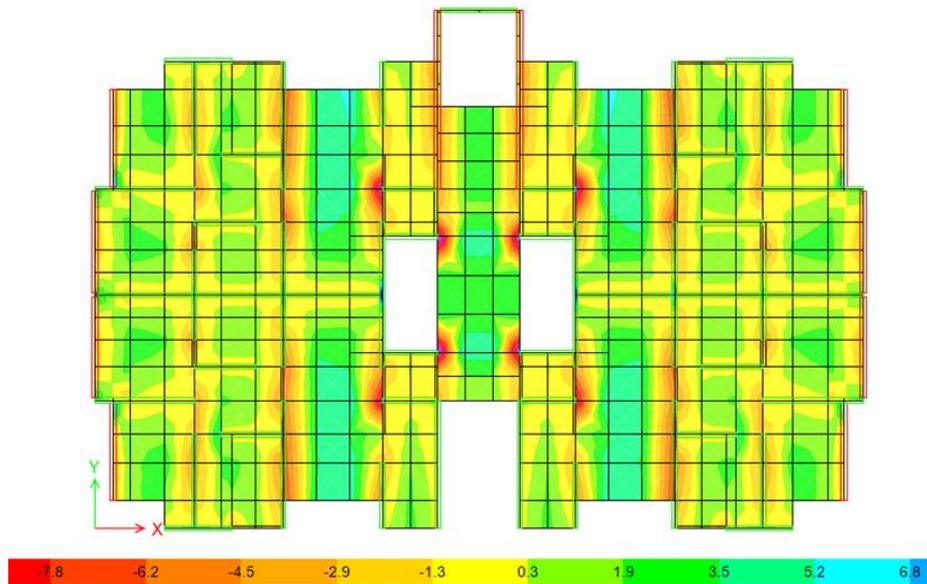


Figura 4.

Resultados momentos M22 kN-m/m

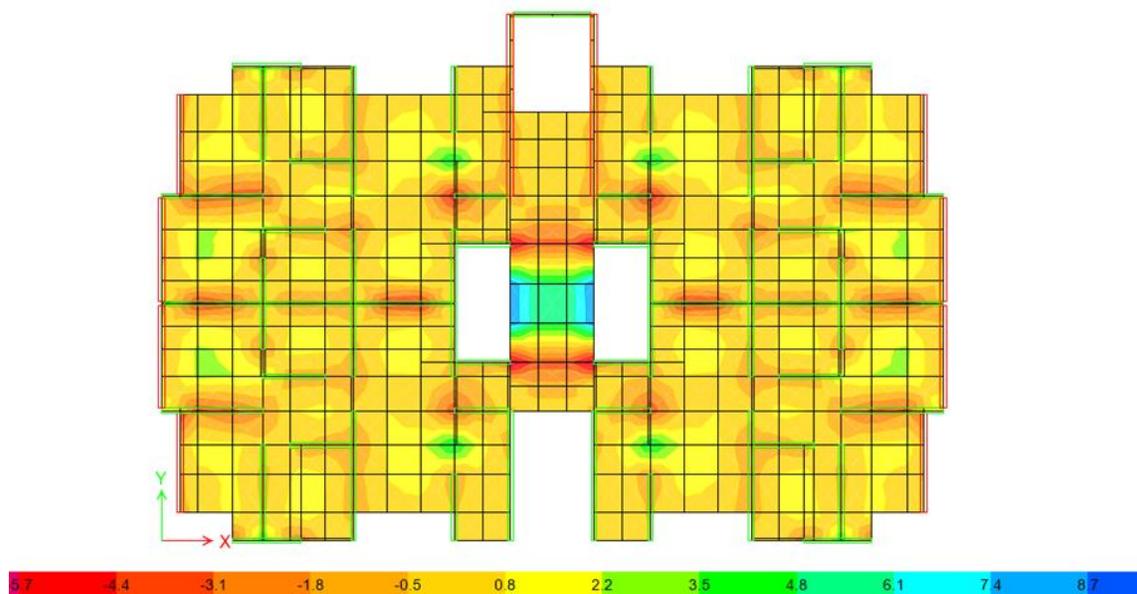


Tabla 17.*Refuerzo a flexión en la losa de entrepiso*

| | Unidades | Parametros |
|-------------------|-----------------|------------------------|
| Altura de la losa | m | 0.12 |
| f_c | MPa | 28.0 |
| f_y | MPa | 420.0 |
| Recubrimiento | mm | 20 |
| ρ^- | [-] | 0.001800 |
| ρ^+ | [-] | 0.001800 |
| A_s^- | mm ² | 180.0 |
| A_s^+ | mm ² | 180.0 |
| ϕM_n^- | kN-m/m | 6.696 |
| ϕM_n^+ | kN-m/m | 6.696 |
| Refuerzo superior | [-] | Malla ele. 15x15 Ø 6mm |
| Refuerzo inferior | [-] | Malla ele. 15x15 Ø 6mm |

3.2.2 Diseño a cortante losa de entrepiso

En la Figura 5 y Figura 6 se presenta la distribución de la fuerza de corte en la losa. La capacidad de fuerza cortante que puede absorber el concreto es de 67.47 kN/m calculada según la ecuación C.11-3 de la NSR-10. La capacidad de la fuerza cortante del concreto de la losa es mayor a las solicitaciones.

Figura 5.

Resultados fuerza cortante V13 kN/m/m

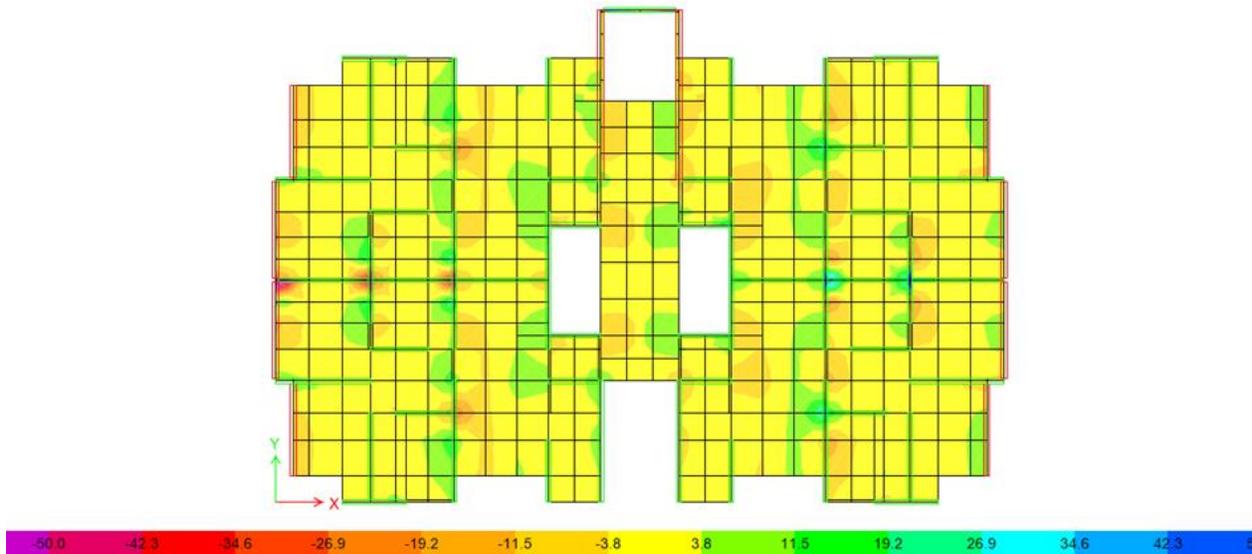
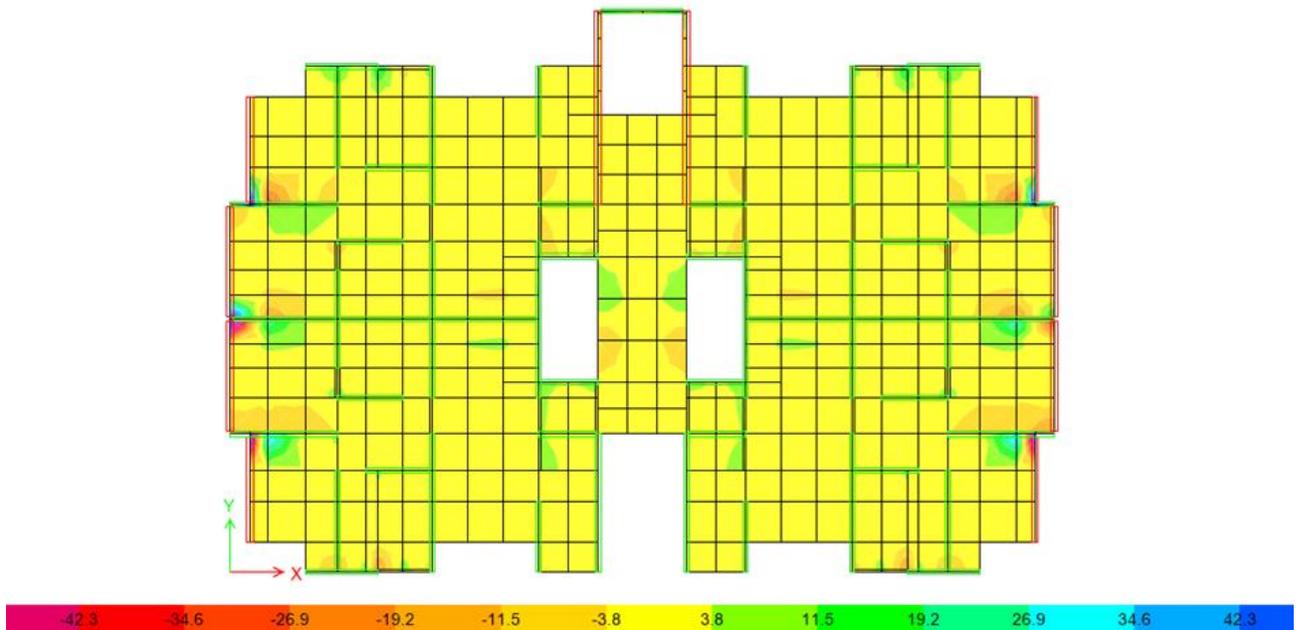


Figura 6.

Resultados fuerza cortante V23 kN/m/m



3.3 Diseño de muros estructurales

Los muros estructurales son los elementos principales de resistencia sísmica en el proyecto. Como se indicó en la descripción del Modelo1, los muros estructurales se diseñaron en el plano. Conforme a los requisitos del Capítulo C.21, Artículo C.21.9 del NSR-10.

Se presentará el diseño del Muro M-1Y, que tiene una longitud $l_w=3.0$ m y ancho $h=0.20$ m. La altura del muro es $h_w=30.24$ m el cual inicia en la cimentación y termina en la cubierta. Para todos los niveles $f'_c=28\text{MPa}$ y el acero de refuerzo es corrugado, con resistencia a la fluencia $f_y=420\text{MPa}$.

3.3.1 Diseño por cortante

Se verificó para todos los niveles y para cada combinación de carga que la fuerza cortante en el plano cumpla $\phi V_n \geq V_u$, según la ecuación C.11-1 de la NSR-10. El coeficiente de reducción para cortante es $\phi=0.60$ según el Artículo C.9.3.2.3 de la NSR-10. Los datos de diseño a cortante del muro se presentan en la Tabla 18. En la Tabla 19 se presenta capacidad que tiene el concreto de absorber las fuerzas de corte y en la Tabla 20 se dispone del refuerzo a corte del muro.

Tabla 18.*Parámetros y resistencia máxima a cortante del muro*

| Parámetros | Unidades | Valores |
|------------------------------------------|----------|---------|
| h | m | 0.20 |
| Lw | m | 3.00 |
| f _c | MPa | 28.0 |
| f _y | MPa | 420.0 |
| ρ _t | [-] | 0.00250 |
| φ | [-] | 0.6 |
| α _c | [-] | 0.170 |
| λ | [-] | 1 |
| V _u | kN | 265.0 |
| φV _n max C.11.9.3 | kN | 1393.48 |
| φV _n max C.21.9.4.1 | kN | 773.19 |
| V _u max < φV _n max | [-] | Cumple |

Tabla 19.*Resistencia a corte aportada por el concreto*

| Parámetros | Unidades | Valores |
|---------------------------------------|----------|---------|
| h | m | 0.20 |
| Lw | m | 3.00 |
| d | m | 2.40 |
| λ | [-] | 1 |
| f _c | MPa | 28.0 |
| f _y | MPa | 420.0 |
| φ | [-] | 0.6 |
| V _u | kN | 265.0 |
| M _u | kN | 895.0 |
| N _u | kN | 3438.9 |
| M _u /V _u - Lw/2 | m | 1.88 |
| φV _c Eq - C.11-27 | kN | 1098.45 |
| φV _c Eq - C.11-28 | kN | 847.28 |
| φV _c min | kN | 847.28 |
| V _u < φV _c min | [-] | Cumple |

Según el Artículo C.11.9.8 en los muros donde el V_u sea mayor que $0.5\phi V_c$ calculado según las ecuaciones C.11-27 y C.11-28 el refuerzo a cortante del muro se debe determinar según la Sección C11.9.9 utilizando la ecuación C.11-2, donde ϕ toma el valor de 0.60 según el Artículo C.9.3.4. Según lo descrito en los Artículos C.11.9.9.2, C.11.9.9.3, C.11.9.9.4, C.11.9.9.5 y C.21.9.2.1 debe suministrarse refuerzo a cortante horizontal y vertical. La cuantía de refuerzo horizontal debe ser mayor o igual a 0.0025. El espaciamiento del refuerzo horizontal no debe exceder $l_w/5$, o 45mm. La cuantía de refuerzo vertical debe determinarse según la ecuación C.11-30 pero no puede ser menor a 0.0025. El espaciamiento del refuerzo vertical no debe exceder $l_w/3$ o 45mm. Cuando el V_u excede el valor calculado según el Artículo C.21.9.2.3 se coloca dos capas de refuerzo. Según los valores de la fuerza cortante de la Tabla 19 se presenta en la Tabla 20 la cuantía de refuerzo y el refuerzo suministrado a cortante para el muro M-1Y.

Tabla 20.*Refuerzo a corte del muro*

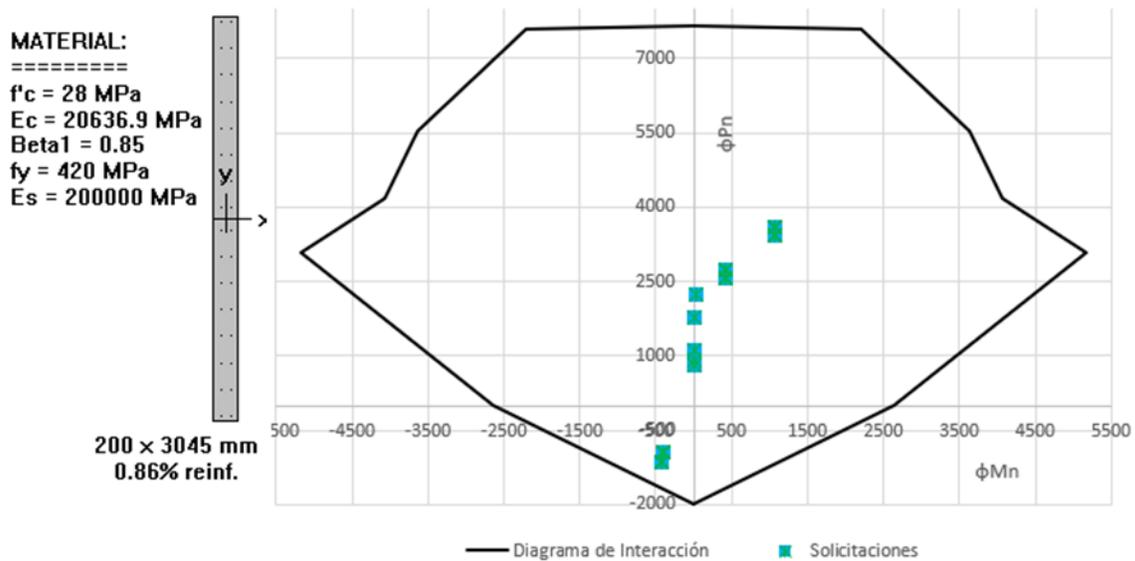
| Parámetros | Unidades | Valores |
|-----------------------------|----------------|---------------|
| h | m | 0.2 |
| L _w | m | 3.00 |
| d | m | 2.4 |
| λ | [-] | 1 |
| f _c | MPa | 28 |
| f _y | MPa | 420 |
| ϕ | [-] | 0.6 |
| V _u | kN | 265 |
| ϕV_c min | kN | 847.28 |
| $V_u > 0.5\phi V_c$ min | [-] | No cumple |
| $V_s = V_u - \phi V_c$ min | kN | -582.28 |
| V _u max | kN | 431.8 |
| $V_u < V_u$ max | [-] | Dos mallas |
| S | m | 0.20000 |
| A _v | m ² | 0.00014 |
| V _s suministrado | kN | 715.7 |
| Res. nominal muro | kN | 1563.0 |
| ρ_t | [-] | 0.00355 |
| ρ_l | [-] | 0.00355 |
| Ref. suministrado | [-] | 1 N 3 C/ 0.20 |

3.3.2 Diseño a flexo-compresión

Para el diseño del muro se presenta en la Figura 7 la curva de resistencia reducida ϕM_n , ϕP_n , donde $\phi=0.65$ es para la sección controlada por compresión y $\phi=0.9$ para la sección controlada por tensión según el Artículo C.9.3.2 de la NSR-10. En zonas intermedias se hace una transición lineal entre estos valores según el Artículo C.9.3.2.2 de la NSR-10. Para definir el límite superior de la carga axial en el diagrama se usó $\phi=0.75$, la resistencia axial de diseño se determina con la ecuación C.10.2 de la NSR-10.

Figura 7.

Diagrama de interacción muro M-1Y



3.3.3 Revisión del elemento de borde

Según el análisis efectuado la mayor profundidad del bloque de compresiones medido desde la fibra más extrema a compresión fue de 0.98m. Para determinar la necesidad de elementos de borde se utiliza la ecuación C.21-11: $c \geq l_w / (600 * (\delta u / h_w))$; donde c es la profundidad del eje neutro; la relación $\delta u / h_w$ no se toma menor que 0.007. Para este caso particular $0.98 \geq 0.73$, por tanto, el muro tiene la necesidad de elementos de borde. La profundidad horizontal del elemento de borde no debe ser menor que el mayor valor entre $c - 0.1l_w$ (0.65 m) y $c/2$ (0.49 m) según el Artículo C.21.9.6.4 (a) de la NSR-10.

Para el muro M-1Y la profundidad horizontal del elemento de borde debe ser de 650mm. El refuerzo longitudinal en cada elemento de borde se distribuye en esa longitud, en consecuencia, cada pareja de barras 5/8" se encuentran separadas 200mm.

El refuerzo transversal de los elementos especiales de borde debe cumplir con los requisitos de la Ecuación C.21-7, $A_{sh} / (S_b C) = 0.3 f'c / f_y [(A_g / A_{ch}) - 1]$, y C.21-8, $A_{sh} / (S_b C) = 0.09 f'c / f_y$ de la NSR-10. En la Tabla 21 se muestran los resultados para el muro M-1Y. La separación del refuerzo transversal no debe ser mayor que 1/3 de la menor dimensión del elemento de borde.

Tabla 21.*Refuerzo transversal del elemento de borde*

| Parámetros | Unidades | Valores | Descripción |
|-----------------------|-----------------|---------|----------------------------------|
| Lc | mm | 650 | Longitud elemento de borde |
| hc | mm | 200 | Ancho elemento de borde |
| f _c | MPa | 28.0 | Resistencia del concreto |
| F _y | MPa | 420 | Resistencia del acero |
| A _g | mm ² | 130000 | Área bruta elemento de borde |
| A _{ch} | mm ² | 86800 | Área confinada elemento de borde |
| Ash/s*bc | Ec. C.21-27 | [-] | Artículo C.21.6.4.4 de la NSR-10 |
| Ash/s*bc | Ec. C.21-28 | [-] | Artículo C.21.6.4.4 de la NSR-10 |
| Ash/s*bc | [-] | 0.0082 | Máximo valor |
| S | mm | 60 | Separación vertical |
| Ash | mm ² | 288.6 | Área de refuerzo solicitado |
| barra | Pulg | 3/8 | Refuerzo para el estribo |
| # ramas requeridas | [-] | 4.0 | Ramas calculadas |
| # ramas suministradas | [-] | 4.0 | Ramas asignadas |
| Chequeo | [-] | Cumple | Chequeo |

3.4 Diseño de la cimentación

Para el análisis y diseño de la cimentación se utilizó un concreto de $f'_c = 28$ MPa y acero de refuerzo con una resistencia a la fluencia igual a $f_y = 420$ MPa. Se realizó un análisis en el que se considera un sistema de cimentación rígido y la suposición de una distribución lineal de presiones determinando el área total de contacto con la siguiente expresión $A = \frac{\text{Carga de servicio}}{q_a}$, con el fin de determinar el área de contacto mínima para cumplir con el requisito de no superar el esfuerzo admisible del suelo con respecto a las cargas de servicio como se indica en el Artículo C.15.1 de la NSR-10.

Las cargas de servicio se obtienen del modelo matemático, las cargas de servicio en la cimentación D+L esta carga de servicio tiene un valor de 49230.7 kN y el esfuerzo admisible del

suelo es de 300 kN/m^2 por tanto el área de contacto mínima requerida es $A = \frac{49230.7 \text{ kN}}{300 \text{ kN/m}^2} = 164.1 \text{ m}^2$, por tanto se decide realizar una losa de cimentación que tendrá un ancho de 16 m, largo de 25.4 m y un espesor de 0.4 m.

3.4.1 Revisión esfuerzos en la cimentación

Para efectuar el cálculo de los esfuerzos se determinó la rigidez de soporte de la cimentación a través de las expresiones descritas en el ASCE 41-17 en su Capítulo 8, Figura 8-2. Estos coeficientes fueron asignados al modelo matemático a través de la función Área Spring, que realiza la distribución de la rigidez utilizando un ancho aferente a cada nodo que compone el elemento Shell. Además, se realizó un ajuste de los coeficientes cercanos a los extremos para corregir los valores de rigidez rotacional. Se distribuyen en 4 zonas marcadas por colores y con coeficientes de rigidez corregidos. En la Tabla 22 se presentan los coeficientes de rigidez calculados y en la Figura 8 se evidencia la distribución en planta de estos coeficientes en la cimentación.

Tabla 22.

Parámetros y coeficientes de rigidez para la losa de cimentación

| Parámetros estudio de suelos | | | Descripción |
|------------------------------|-------------------|------|----------------------------------------|
| E | MPa | 22.5 | Módulo de elasticidad |
| V _{so} | m/s | 325 | Velocidad de onda |
| ρ _s | kg/m ³ | 2700 | Densidad del suelo |
| Q _a | kN/m ² | 300 | Capacidad portante admisible del suelo |
| V _{coef.Poisson} | [-] | 0.3 | Coefficiente de poisson |
| Factor de seguridad | [-] | 3.0 | Factor de seguridad |
| A _a | [-] | 0.35 | Aceleración pico efectiva |

| Parámetros geométricos | | | Descripción |
|------------------------|----------------|-------|---------------|
| Ancho losa cim. | m | 16.00 | |
| Largo losa cim. | m | 25.4 | |
| I _x | m ⁴ | 21849 | Inercia en x |
| I _y | m ⁴ | 8670 | Inercia en y |
| I _t | m ⁴ | 30519 | Inercia polar |

| Parámetros de cálculo | | | Descripción |
|-----------------------|-----|--------|---------------------------------------------------------|
| Site Class | [-] | C | Coefficiente de sitio |
| S _v | [-] | 0.35 | Aceleración pico efectiva |
| F _a | [-] | 1.05 | Coefficiente de amplificación para periodos cortos |
| S _{vs} | [-] | 0.15 | Parámetro de aceleración espectral para periodos cortos |
| G/Go | [-] | 0.85 | Factor de reducción de velocidad de onda de corte |
| Go | MPa | 285.09 | Velocidad de onda de corte reducida |
| G | MPa | 242.33 | Velocidad de onda de corte |
| B | m | 8.00 | Ancho de cimentación |
| L | m | 12.70 | Longitud de cimentación |
| h | m | 1.00 | Profundidad promedio de cimentación |
| d | m | 0.40 | Espesor de cimentación |
| D | m | 1.40 | Profundidad de emplazamiento |

| Factores de corrección | | | Descripción |
|------------------------|-----|------|---------------------------------------------------------------|
| η _x | [-] | 1.26 | Factor de corrección de rigidez por profundidad x |
| η _y | [-] | 1.26 | Factor de corrección de rigidez por profundidad y |
| η _z | [-] | 1.10 | Factor de corrección de rigidez por profundidad z |
| η _{xx} | [-] | 1.07 | Factor de corrección de rigidez rotacional por profundidad xx |
| η _{yy} | [-] | 1.25 | Factor de corrección de rigidez rotacional por profundidad yy |

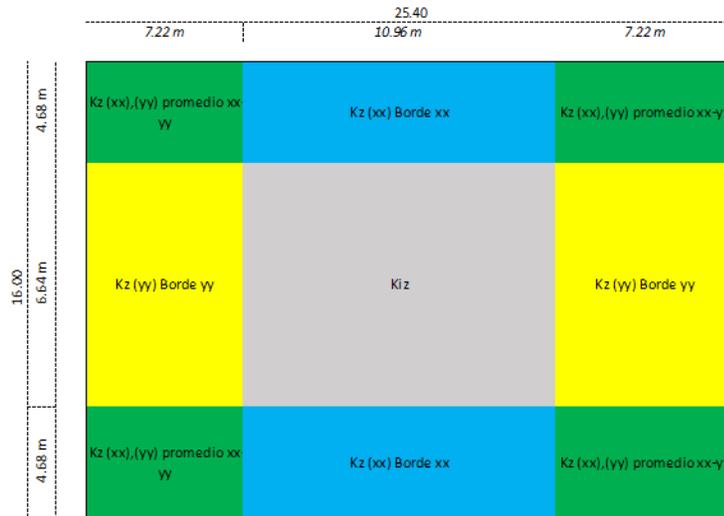
| Grado de libertad | | | Descripción |
|---------------------|------|------------|---------------------------|
| K _{x,sur} | kN/m | 20649847 | Rigidez traslacional en x |
| K _{y,sur} | kN/m | 16859974.3 | Rigidez traslacional en y |
| K _{z,sur} | kN/m | 17524563.1 | Rigidez traslacional en z |
| K _{xx,sur} | kN-m | 2021472538 | Rigidez rotacional xx |
| K _{yy,sur} | kN-m | 1247427600 | Rigidez rotacional yy |

| Intensidad de rigidez en los extremos | | | Descripción |
|---------------------------------------|-------------------|----------|--------------------------------------------------|
| K _{iz} | kN/m ³ | 43121.46 | Intensidad de rigidez |
| R _e | [-] | 0.4 | Relación de longitud final cimentación |
| R _{k,yy} | [-] | 1.41 | Coefficiente de corrección de rigidez rotacional |
| R _{k,xx} | [-] | 6.62 | Coefficiente de corrección de rigidez rotacional |

| Zona | K _{iz} [kN/m ³] |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| K _z | 43121.46 |
| K _z (yy) Borde yy | 60941.06 |
| K _z (xx,yy) promedio xx-yy | 173229.78 |
| K _z (xx) Borde xx | 285518.50 |

Figura 8.

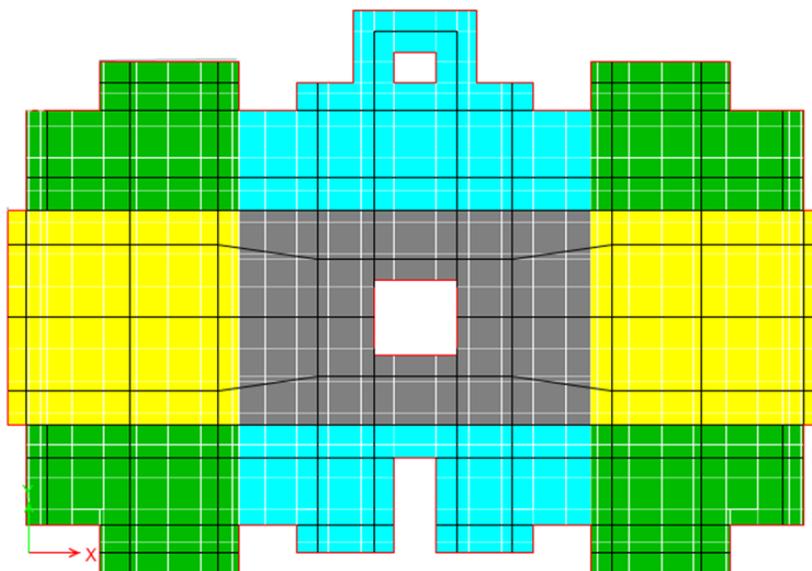
Distribución de coeficientes de rigidez en la losa de cimentación



En la Figura 9 se visualiza la distribución de los coeficientes de rigidez en el modelo matemático.

Figura 9.

Modelo matemático losa de cimentación



En la Tabla 23 se presentan las combinaciones de cargas realizadas para la evaluación y diseño de la cimentación, estas corresponden a las combinaciones de carga por esfuerzos admisibles según la NSR-10 Título B.

Tabla 23.

Combinaciones de carga revisión y diseño de cimentación

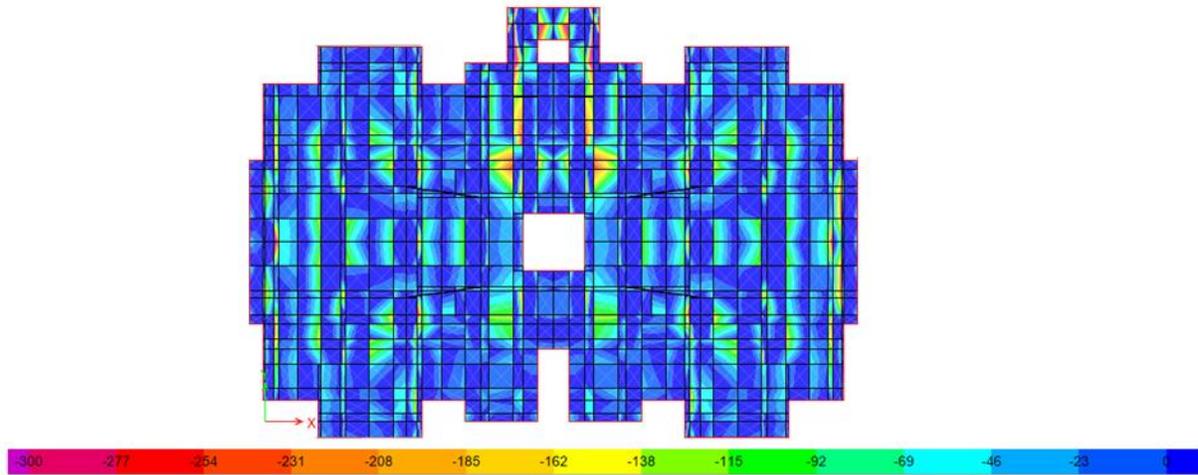
| Combinaciones de Carga | Dead | Live | Ex | Ey |
|------------------------------|------|------|-------|-------|
| S1 = 1.0D+1.0L | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 |
| S2 = 1.0D+0.7Ex | 1.0 | 0.0 | 0.70 | 0.0 |
| S3 = 1.0D+0.7Ey | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.70 |
| S4 = 1.0D+0.75L+0.75*(0.7Ex) | 1.0 | 0.70 | 0.525 | 0.0 |
| S5 = 1.0D+0.75L+0.75*(0.7Ey) | 1.0 | 0.70 | 0.0 | 0.525 |
| S6 = 0.6D+0.7Ex | 0.6 | 0.0 | 0.70 | 0.0 |
| S7 = 0.6D+0.7Ey | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.70 |

Teniendo la distribución de esfuerzos sobre la cimentación se procede a revisar los esfuerzos con el fin de verificar que no superen el valor presentado en los parámetros geotécnicos de 300kN/m². En la Figura 10 se presenta la distribución de esfuerzo bajo la cimentación.

Se presentan los esfuerzos en la cimentación planteada, los esfuerzos son de compresión y no superan el esfuerzo admisible recomendado en los parámetros geotécnicos.

Figura 10.

Esfuerzos en la cimentación por cargas de servicio ($S1=1.0D+1.0L$)



3.4.2 Diseño a flexión

Para el diseño de la losa de cimentación se revisaron los momentos M_{11} y M_{22} para determinar la demanda a flexión en la losa de cimentación, se propuso una losa de espesor de 0.40m que cumplen con lo descrito en el Título C, Artículo C.7.7.1 de la NSR-10 ya que todo el elemento tiene un recubrimiento de concreto mínimo de 75mm y el refuerzo propuesto no está separado a una distancia mayor a tres veces el espesor de la losa, ni 450mm según el Título C.10, Artículo C.10.5.4 y C.15.10.4 de la NSR-10.

Para el diseño a flexión de la cimentación se selecciona la combinación de carga más desfavorable, es decir la que mayor demanda genera en el elemento con el fin de suplir la necesidad de acero.

Tabla 24.*Resistencia a flexión y cortante losa cimentación*

| Parametros | Unidades | Valores |
|---------------------|-----------------|---------------|
| Espesor cimentación | m | 0.40 |
| f_c | MPa | 28 |
| f_y | MPa | 420 |
| Recubrimiento | mm | 75 |
| ρ^- | [-] | 0.001800 |
| ρ^+ | [-] | 0.001800 |
| A_s^- | mm ² | 585.0 |
| A_s^+ | mm ² | 585.0 |
| ϕM_n^- | kN-m/m | 70.722 |
| ϕM_n^+ | kN-m/m | 70.722 |
| Refuerzo superior | [-] | 1N 4 C/ 0.20m |
| Refuerzo infeior | [-] | 1N 4 C/ 0.20m |
| ϕV_c | kN/m | 219.27 |

En la Figura 11 y 12 se presenta la máxima demanda a flexión para la losa de cimentación.

El refuerzo en la dirección X y dirección Y, se presenta en la Tabla 24.

Figura 11.

Momento M11 en losa de cimentación. $M_{max}=65kN-m/m$

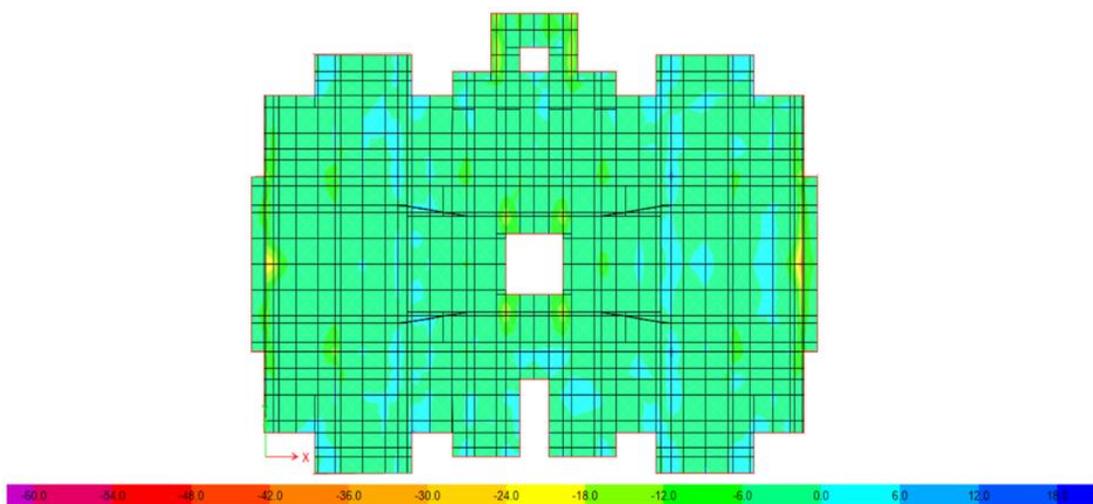
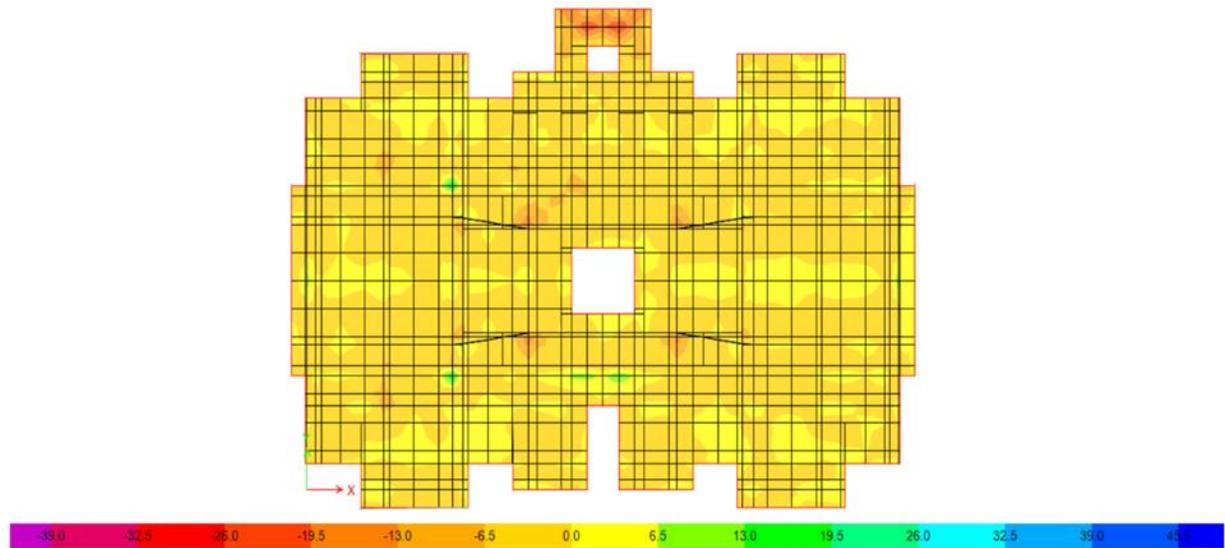


Figura 12.

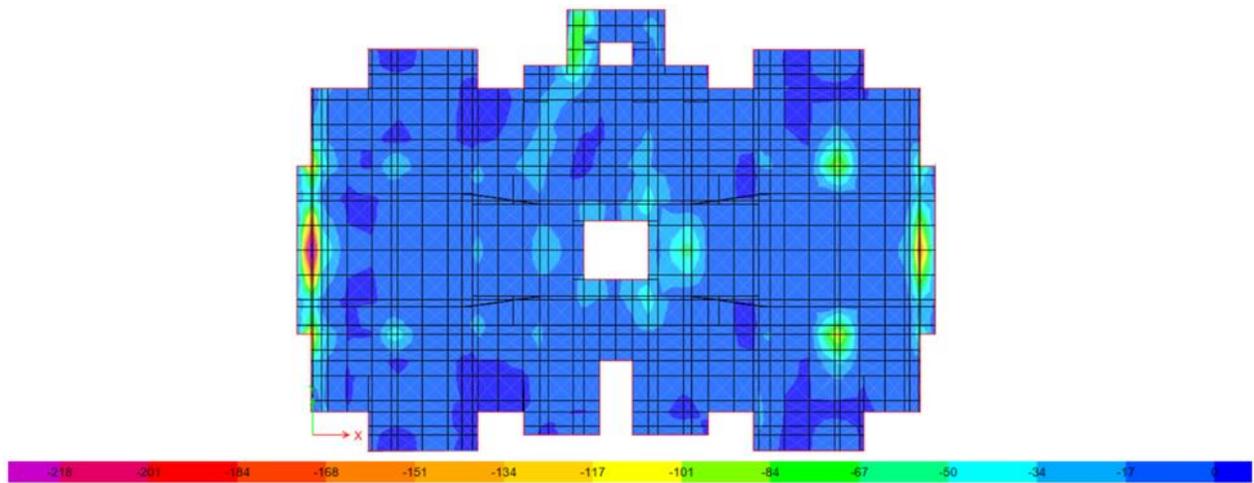
Momento M_{22} en losa de cimentación. $M_{max}=50\text{kN-m/m}$

**3.4.3 Revisión a cortante en losa de cimentación**

Según el capítulo C.11 de NSR-10, se revisa el cortante en la losa para las combinaciones de carga. Se verifica que el esfuerzo a cortante no supere $\phi * 0.17 * \sqrt{f'c} * bw * d$. En la Figura 13 se presenta el diagrama de fuerza cortante V_u con la cual se compara con la resistencia a cortante que se presenta en la Tabla 23 y se verifica que $V_u < \phi V_n$, con lo cual no se requiere refuerzo a cortante.

Figura 13.

Cortante V12 en losa de cimentación. $V_{max}=218kN/m$

**3.5 Diseño viga de cimentación**

Las vigas de cimentación son elementos que poseen una gran rigidez que sirve para transmitir las fuerzas cortantes entre los muros estructurales y la cimentación. Las dimensiones de las vigas de cimentación son de 500x700mm. El refuerzo especificado para las vigas de cimentación es corrugado con $f_y = 420\text{MPa}$ y la resistencia a la compresión del concreto es de $f'_c = 28\text{MPa}$. El recubrimiento libre hasta el estribo debe ser de 75mm.

3.5.1 Diseño a flexión

En la Figura 14 se presenta el diagrama de momentos de la envolvente de las combinaciones de carga presentadas en la Tabla 23. En la Tabla 25 se presenta los datos utilizados para el cálculo del refuerzo a flexión y la resistencia nominal de la viga.

Figura 14.

Envoltorio de momentos en vigas de cimentación. $M_{max}=180kN\cdot m$

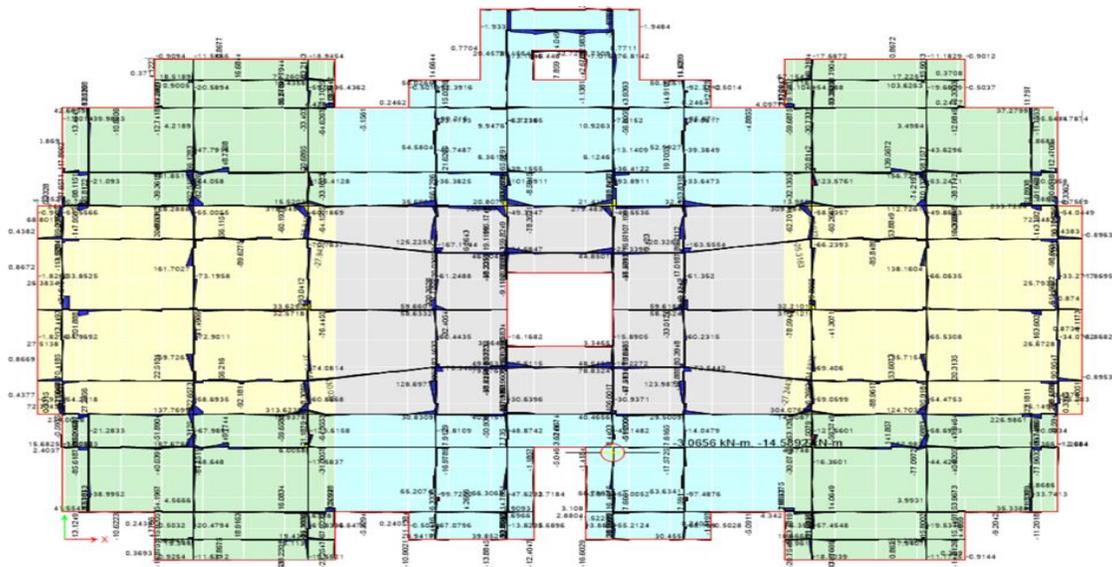


Tabla 25.

Resistencia nominal a flexión y cortante de la viga de cimentación

| Parametros | Unidades | Valores |
|----------------------|-----------------|-----------------------|
| Altura viga | m | 0.70 |
| Base de la viga | m | 0.50 |
| f_c | MPa | 28 |
| f_y | MPa | 420 |
| Recubrimiento | mm | 60 |
| ρ^- | [-] | 0.00333 |
| ρ^+ | [-] | 0.00333 |
| A_{s-} | mm ² | 1065.6 |
| A_{s+} | mm ² | 1065.6 |
| ϕM_{n-} | kN·m | 250.2 |
| ϕM_{n+} | kN·m | 250.2 |
| Refuerzo superior | [-] | 3Ø5/8" + 2Ø3/4" |
| Refuerzo inferior | [-] | 3Ø5/8" + 2Ø3/4" |
| ϕV_c | kN | 172.71 |
| V_u | kN | 735.00 |
| V_s | kN | 562.29 |
| $S_{calculado}$ | m | 0.12 |
| Refuerzo transversal | [-] | 4 ramas 1/2" C/ 0.12m |
| Resis. cortante viga | kN | 866.22 |

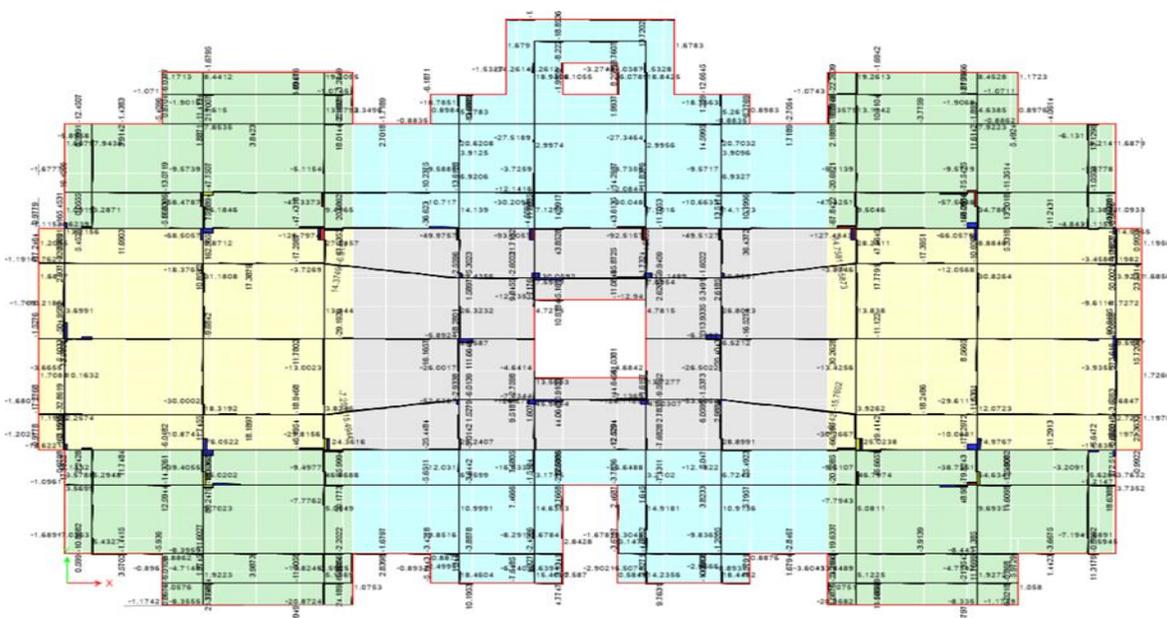
3.5.2 Revisión a cortante viga de cimentación

Según la NSR-10, el diseño de los elementos sometidos a fuerzas cortante debe cumplir que $\phi V_n > V_u$, donde ϕV_n , es la resistencia nominal a cortante $\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s$ y V_u es la fuerza cortante mayorada producto de las combinaciones de diseño, para efectos de diseño $\phi V_s = V_u - \phi V_c$, donde ϕV_c es la resistencia nominal proporcionada por el concreto y ϕV_s es la resistencia nominal proporcionada por el acero, el coeficiente de reducción para cortante ϕ se toma como 0.75 según el Artículo C.9.3 de la NSR-10.

Según la Figura 15 la máxima sollicitación a cortante es de 735 kN, la resistencia que aporta el concreto es $\phi V_c = 172.71$ kN y por tanto se adiciona 2 ramas de estribos de N4 cada 0.12 m. La máxima capacidad de la sección a cortante es de 866.22 kN, con esta configuración de refuerzo a cortante se cumple con la condición de $\phi V_n > V_u$ como se detalla en la Tabla 25.

Figura 15.

Diagrama de fuerza a cortante. $V_{max} = 735$ kN



4. Fase 2: Análisis Estático no Lineal

En este capítulo se ejecuta el análisis estático no lineal para cada dirección de estudio según lineamientos de ASCE 41-17. Se revisa la aplicación de este tipo de análisis y el desempeño de los elementos primarios de la estructura.

4.1 Generalidades requisitos según el ASCE 41-17

Se relacionan los siguientes aspectos para determinar la clasificación del edificio y el objetivo del desempeño, acorde al ASCE 41-17.

4.1.1 Tipo de edificio

Según el sistema estructural y su uso, el edificio se clasifica en la tipología tipo C2, según Tabla 3-1 de ASCE 41-17, en la tipología C2 se contempla edificaciones con muros losas de concreto fundidas en sitio, los muros de concreto resisten las fuerzas sísmicas.

4.1.2 Objetivo de nivel de desempeño

Para establecer el nivel de desempeño se utilizará los lineamientos descritos en el Capítulo 2 del ASCE 41-17. Un objetivo de desempeño se define de una o más parejas de un nivel de amenaza sísmica seleccionada, un nivel objetivo de desempeño estructural y objetivo de

desempeño no estructural. Para este proyecto se establece como pareja del nivel de desempeño entre amenaza sísmica y desempeño estructural. No se tendrá en cuenta el desempeño de los elementos no estructurales.

4.1.3 Categoría del riesgo

Se define la categoría del riesgo basados en la tabla 1.5-1 de ASCE 7-16 conforme al uso de la edificación. Se define categoría de riesgo II, cuya descripción recita como todos los edificios excepto las enumeradas en las categorías de riesgo I, III y IV, en este caso no aplica riesgo I por tratarse de edificaciones que representan bajo riesgo para la vida humana.

4.1.4 Nivel de sismicidad

Para clasificar el nivel de amenaza sísmica se usa los parámetros $SDS = 2/3 * Fa * Ss$ y $SD1 = 2/3 * Fv * S1$. Los valores de Fa y Fv de la tabla 11.4-1 y 11.4-2 del ASCE7-16 corresponden a los mismos valores de la tabla A.2.4-3 y A.2.4-4 del NSR-10 teniendo en cuenta la clasificación del tipo de suelo y los valores de Aa y Av definidos en la Tabla 4. Se sigue las equivalencias dadas en el documento de la AIS 180-13 (AIS -180, 2012) con respecto a la NSR-10 es $Ss = 3.75 * Aa * 1.1 = 1.13$ y $S1 = 1.8 * Av * 1.3 = 0.63$. Con base en estos valores se determinan los valores de $SDS = 2.5 * Aa * Fa * I = 0.92$ y $SD1 = 1.2 * Av * Fv * I = 0.54$. Según la Sección 2.4.1.2 en la Tabla 2-4 del ASCE 41-17 corresponde a un nivel de amenaza sísmica alta.

4.1.5 Nivel de desempeño objetivo del edificio

Según la Tabla 2-3 Basic Performance Objective Equivalent to New Building Standards (BPON) del ASCE41-17, el objetivo de desempeño de este edificio nuevo con categoría de riesgo II y nivel de amenaza sísmica alta para una condición BSE-1N es “Life Safety”, que se traduce como seguridad de la vida. De acuerdo a la Sección 2.3.3 de ASCE 41-17 los niveles de desempeño se definen alfanuméricamente, para considerar el nivel de desempeño de los elementos estructurales y no-estructurales. Como sólo se tiene el desempeño de los elementos estructurales, se designa el nivel de desempeño objetivo para el edificio como “Life Safety (S-3)”, según la definición de la Sección 2.3.1.3 del ASCE41-17.

4.2 Modelo de análisis

Se describe los aspectos y parámetros del modelo matemático que simula el comportamiento del edificio.

4.2.1 Requisitos de modelo de análisis por ASCE 41-17

Según la Sección 7.2.3.1 de ASCE 41-17 el modelo matemático debe ser analizado y evaluado por componentes en tres dimensiones y debe representar explícitamente las variables de resistencia y rigidez de todos sus elementos.

4.2.2 Torsión

En las Tablas 26 y 27 se presentan los valores de η que representa la relación entre la deriva máxima y la deriva promedio de cada piso. Según la Sección 7.2.3.2.2 del ASCE 41-17 la torsión no se debe considerar en el modelo matemático si se cumplen las siguientes condiciones: la relación $\eta \leq 1.1$ ó la relación entre el momento torsor accidental y el momento torsional inherente no debe ser mayor al 25%. Para este estudio se escogió la relación entre factores η . Los resultados de las Tablas 26 y 27 muestran que no es necesario incluir los efectos de la torsión accidental en la modelación.

Tabla 26.

Evaluación de los efectos de la torsión dirección X

| Piso | Direccion X sin torsion accidental | | | Direccion X con torsion accidental | | | Relacion $\eta_2/\eta_1 \leq 1.1$ |
|------|------------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|-------------|--------------------------------------|
| | Dmax ₁ | Dprom ₁ | η_{1x} | Dmax ₂ | Dprom ₂ | η_{2x} | |
| 12 | 0.1721 | 0.1628 | 1.06 | 0.1764 | 0.1650 | 1.07 | 1.01 |
| 11 | 0.1592 | 0.1507 | 1.06 | 0.1631 | 0.1527 | 1.07 | 1.01 |
| 10 | 0.1452 | 0.1376 | 1.06 | 0.1488 | 0.1395 | 1.07 | 1.01 |
| 9 | 0.1302 | 0.1235 | 1.05 | 0.1334 | 0.1252 | 1.07 | 1.01 |
| 8 | 0.1142 | 0.1085 | 1.05 | 0.1170 | 0.1099 | 1.06 | 1.01 |
| 7 | 0.0975 | 0.0927 | 1.05 | 0.0998 | 0.0939 | 1.06 | 1.01 |
| 6 | 0.0805 | 0.0766 | 1.05 | 0.0823 | 0.0776 | 1.06 | 1.01 |
| 5 | 0.0634 | 0.0604 | 1.05 | 0.0649 | 0.0612 | 1.06 | 1.01 |
| 4 | 0.0468 | 0.0447 | 1.05 | 0.0478 | 0.0452 | 1.06 | 1.01 |
| 3 | 0.0312 | 0.0298 | 1.05 | 0.0319 | 0.0302 | 1.06 | 1.01 |
| 2 | 0.0172 | 0.0165 | 1.04 | 0.0176 | 0.0167 | 1.05 | 1.01 |
| 1 | 0.0060 | 0.0058 | 1.04 | 0.0062 | 0.0059 | 1.05 | 1.01 |

Tabla 27.*Evaluación de los efectos de la torsión dirección Y*

| Piso | Dirección Y sin torsión accidental | | | Dirección Y con torsión accidental | | | Relación $\eta_2/\eta_1 \leq 1.1$ |
|------|------------------------------------|--------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|-------------|--------------------------------------|
| | Dmax ₁ | Dprom ₁ | η_{1y} | Dmax ₂ | Dprom ₂ | η_{2y} | |
| 12 | 0.1753 | 0.1603 | 1.09 | 0.1856 | 0.1656 | 1.12 | 1.02 |
| 11 | 0.1598 | 0.1457 | 1.10 | 0.1693 | 0.1506 | 1.12 | 1.02 |
| 10 | 0.1436 | 0.1306 | 1.10 | 0.1521 | 0.1351 | 1.13 | 1.02 |
| 9 | 0.1267 | 0.1150 | 1.10 | 0.1343 | 0.1189 | 1.13 | 1.03 |
| 8 | 0.1092 | 0.0989 | 1.10 | 0.1158 | 0.1023 | 1.13 | 1.03 |
| 7 | 0.0915 | 0.0827 | 1.11 | 0.0971 | 0.0855 | 1.14 | 1.03 |
| 6 | 0.0739 | 0.0665 | 1.11 | 0.0784 | 0.0689 | 1.14 | 1.03 |
| 5 | 0.0567 | 0.0509 | 1.11 | 0.0602 | 0.0527 | 1.14 | 1.03 |
| 4 | 0.0405 | 0.0363 | 1.12 | 0.0430 | 0.0376 | 1.15 | 1.03 |
| 3 | 0.0259 | 0.0231 | 1.12 | 0.0275 | 0.0240 | 1.15 | 1.03 |
| 2 | 0.0135 | 0.0121 | 1.12 | 0.0145 | 0.0126 | 1.15 | 1.03 |
| 1 | 0.0044 | 0.0040 | 1.12 | 0.0048 | 0.0041 | 1.15 | 1.03 |

4.2.3 Elemento primario y secundario

Según la Sección 7.5.1.1 del ASCE 41-17 para realizar la modelación se debe clasificar los componentes de la estructura en primarios o secundarios. Los elementos primarios son aquellos que aportan la mayor parte de la rigidez y resistencia en la estructura y los secundarios son aquellos que presentan una degradación importante en su resistencia y rigidez y por tanto su resistencia no es confiable. Para este modelo matemático se clasificaron los muros de concreto reforzado como los elementos primarios. Según la Sección 7.2.3.3 del ASCE 41-17 los elementos primarios, es decir los muros estructurales, deben ser evaluados para fuerzas y deformaciones ocasionadas por combinaciones de cargas gravitacionales y sismo, incluyendo la degradación de resistencia y la rigidez de los elementos primarios en el modelo de análisis del edificio.

4.2.4 Flexibilidad de la cimentación

En el modelo de análisis se consideró la flexibilidad de la cimentación. El procedimiento es consistente con los requerimientos de la Sección 7.2.3.5 y el Capítulo 8 de ASCE 41-17, método 2 determinando los coeficientes vertical y rotacional de la cimentación basados en las expresiones contenidas en la Figura 8.2 del ASCE 41-17. La distribución de la rigidez en la geometría del cimiento se realizó acorde a las recomendaciones de la Sección 8.4.2.4.1 del ASCE 41-17. En la Sección 3.4 del presente documento se muestra la distribución de la rigidez de la cimentación con el fin de contemplar la flexibilidad dentro del análisis.

4.2.5 Amortiguamiento

Para el análisis del modelo estructural se asignó un espectro de respuesta amortiguada del 5% según la Sección 7.2.3.6 del ASCE 41-17. Esto es debido a que no se cumple ninguna de las condiciones descritas en ese mismo numeral que indican que deben cambiar el porcentaje del amortiguamiento del espectro de respuesta.

4.2.6 Efectos sísmicos en múltiples direcciones

En este análisis estructural no se consideró los efectos sísmicos en múltiples direcciones ya que según lo descrito en la Sección 7.2.5 de ASCE 41-17 el modelo matemático corresponde a una estructura regular y sus elementos primarios corresponde a muros de concreto reforzado que trabajan en cada dirección de análisis de forma independiente.

4.2.7 Efectos P- Δ en modelo de análisis

Los efectos geométricos no lineales son causados por cargas de gravedad que actúan sobre la configuración desplazada de la estructura por las cargas de servicio, lo que lleva a un aumento de las fuerzas internas en los miembros. En los análisis sísmicos, los efectos de P- Δ son mucho más preocupantes que los efectos de P- δ , estos efectos generalmente no necesitan ser modelados en análisis sísmicos no lineales. Por otro lado, los efectos P- Δ deben modelarse, ya que en última instancia pueden conducir a la pérdida de resistencia lateral, debido a la acumulación gradual de deformaciones residuales bajo carga cíclica e inestabilidad dinámica según la Sección 7.2.6 del ASCE 41-17. Las grandes desviaciones laterales (Δ) aumentan la fuerza interna y las demandas de momento, causando una disminución de la rigidez lateral efectiva. Con el aumento de las fuerzas internas, una menor proporción de la capacidad de la estructura permanece disponible para soportar cargas laterales, lo que lleva a una reducción en la resistencia lateral efectiva.

En el modelo de análisis se incluyó el cálculo automático de los efectos P- Δ en la ejecución de un caso de análisis no lineal basado en la combinación gravitacional QG, según ASCE 41-17 Sección 7.2.2. La combinación de cargas gravitacionales para el análisis de efectos P- Δ es QG=1.0 D+0.25 L y se ajusta a lo requerido en la Sección 7.2.2 de ASCE 41-17. Estos efectos se incluyen en la modelación por recomendación de la Sección 7.2.6 del ASCE 41-17.

4.2.8 Interacción suelo estructura

Según la Sección 7.2.7 del ASCE 41-17 los efectos de la interacción suelo-estructura (SSI - Soil Structure Interaction) se evaluarán para aquellos edificios en los que un cambio en el período

fundamental causado por los efectos de SSI resulta en un aumento en las aceleraciones espectrales, para este proyecto no aplica, porque no se evidencia un cambio significativo en los períodos considerando la cimentación rígida y la flexibilidad de la cimentación basada en las ecuaciones de la Figura 8-2 del ASCE 41-17.

En el modelo matemático se incluye la flexibilidad de la cimentación acorde a los requisitos del Capítulo 8 del ASCE 41-17, usando el método 2 y las ecuaciones presentadas en la Figura 8.2 del ASCE 41-17 que permiten determinar la rigidez vertical y rotacional que es incorporada en el análisis para considerar los efectos de interacción suelo estructura. Los resultados de las ecuaciones de la Figura 8.2 del ASCE 41-17 se presentan en la Tabla 22 del presente documento y la distribución de la rigidez vertical y rotacional se evidencia en la Figura 8 y 9 del presente documento.

4.2.9 Efecto de volcamiento para procedimientos no lineales

Los efectos del vuelco se evalúan según la Sección 7.2.8.2 del ASCE 41-17 para procedimientos no lineales. Los efectos del vuelco sobre los cimientos se considerarán con respecto a las resistencias y rigideces como se especifica en el Capítulo 8, método 2. Esto se logra incorporando unos resortes con rigidez vertical netamente a compresión y de rigidez a tensión cero, cuando se utilizan procedimientos no lineales, los efectos del vuelco generados por el sismo en el lado de tensión de un elemento se incluirán en el modelo analítico como un grado de libertad no lineal, captando cualquier redistribución de fuerzas o deformaciones que ocurra como resultado de este levantamiento.

4.2.10 Clasificación del diafragma

En la Sección 7.2.9.1 de ASCE 41-17 establece que para clasificar un diafragma como rígido o flexible debe ejecutarse un análisis de deformaciones. El diafragma se clasifica como flexible si la máxima deformación lateral del diafragma es mayor a dos veces el promedio de la deriva de piso de los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica; por otro lado, si la máxima deformación lateral del diafragma es menor a la mitad de la deriva de piso promedio de los elementos verticales del sistema de resistencia el diafragma puede considerarse rígido.

Este análisis del diafragma se realiza utilizando las fuerzas sísmicas por piso provenientes del análisis modal espectral por estar ajustado el cortante basal del método de la fuerza horizontal equivalente según el ASCE 41-17 Sección 7.4.1.3.1. En la Tablas 28 y 29 se observan los valores de desplazamiento obtenidos del análisis y la verificación del tipo de diafragma.

Tabla 28.

Clasificación del diafragma en la dirección X

| Piso | D_{x1} m | D_{x2} m | $D_{xcentro}$ m | $2D_{xProm.}$ m | $(1/2)D_{xProm.}$ m | Clasificación [-] |
|------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| 12 | 0.156 | 0.171 | 0.163 | 0.327 | 0.082 | Stiff |
| 11 | 0.144 | 0.158 | 0.151 | 0.303 | 0.076 | Stiff |
| 10 | 0.132 | 0.144 | 0.138 | 0.276 | 0.069 | Stiff |
| 9 | 0.119 | 0.129 | 0.124 | 0.248 | 0.062 | Stiff |
| 8 | 0.104 | 0.114 | 0.109 | 0.218 | 0.054 | Stiff |
| 7 | 0.089 | 0.097 | 0.093 | 0.186 | 0.047 | Stiff |
| 6 | 0.074 | 0.080 | 0.077 | 0.154 | 0.038 | Stiff |
| 5 | 0.058 | 0.063 | 0.061 | 0.121 | 0.030 | Stiff |
| 4 | 0.043 | 0.047 | 0.045 | 0.090 | 0.022 | Stiff |
| 3 | 0.029 | 0.031 | 0.030 | 0.060 | 0.015 | Stiff |
| 2 | 0.016 | 0.017 | 0.017 | 0.033 | 0.008 | Stiff |
| 1 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.012 | 0.003 | Stiff |

Tabla 29.*Clasificación del diafragma en la dirección Y*

| Piso | D_{y1} m | D_{y2} m | $D_{ycentro}$ m | $2D_{yProm.}$ m | $(1/2)D_{yProm.}$ m | Clasificación [-] |
|------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| 12 | 0.175 | 0.146 | 0.160 | 0.321 | 0.080 | Stiff |
| 11 | 0.159 | 0.133 | 0.146 | 0.292 | 0.073 | Stiff |
| 10 | 0.143 | 0.143 | 0.131 | 0.286 | 0.071 | Stiff |
| 9 | 0.126 | 0.126 | 0.115 | 0.252 | 0.063 | Stiff |
| 8 | 0.109 | 0.089 | 0.099 | 0.198 | 0.050 | Stiff |
| 7 | 0.091 | 0.075 | 0.083 | 0.166 | 0.041 | Stiff |
| 6 | 0.073 | 0.060 | 0.066 | 0.133 | 0.033 | Stiff |
| 5 | 0.056 | 0.046 | 0.051 | 0.102 | 0.026 | Stiff |
| 4 | 0.040 | 0.032 | 0.036 | 0.073 | 0.018 | Stiff |
| 3 | 0.026 | 0.021 | 0.023 | 0.046 | 0.012 | Stiff |
| 2 | 0.013 | 0.011 | 0.012 | 0.024 | 0.006 | Stiff |
| 1 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.008 | 0.002 | Stiff |

Según los resultados del análisis el diafragma se clasifica como Stiff o Rígido por tanto se debe evaluar si es necesario incluir los efectos de la torsión accidental en el análisis. En la sección 4.22 del presente documento se determinó que no es necesario incluir los efectos de la torsión accidental en el análisis.

4.3 No linealidad de los materiales

A continuación, se presentan los parámetros que definen la no linealidad de los materiales en los modelos de análisis.

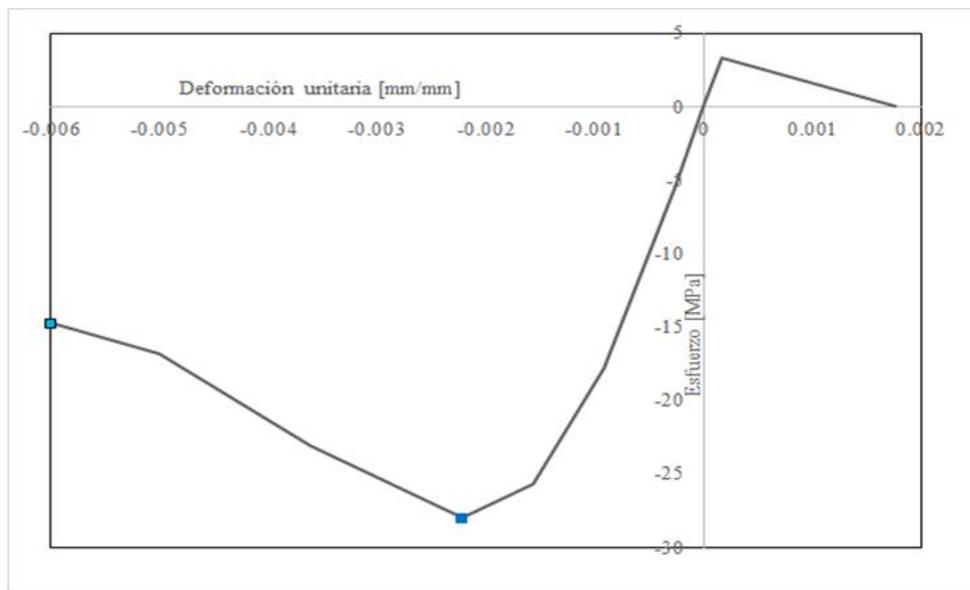
4.3.1 Concreto no confinado

En la Figura 16 se presenta la curva esfuerzo-deformación del concreto no confinado generado automáticamente por el software ETABS® 2015, que tiene incorporado el modelo de

Mander, usando como parámetros para la realización de esta curva, $f'_c=28$ MPa, resistencia a la compresión del concreto no confinado, deformación unitaria máxima ϵ_{co} 0.002, deformación unitaria última del concreto no confinado a compresión pura $\epsilon_{cu}=0.005$ y $\alpha=-0.10$, pendiente final en compresión.

Figura 16.

Curva Esfuerzo-Deformación del concreto no confinado $f'_c=28$ MPa



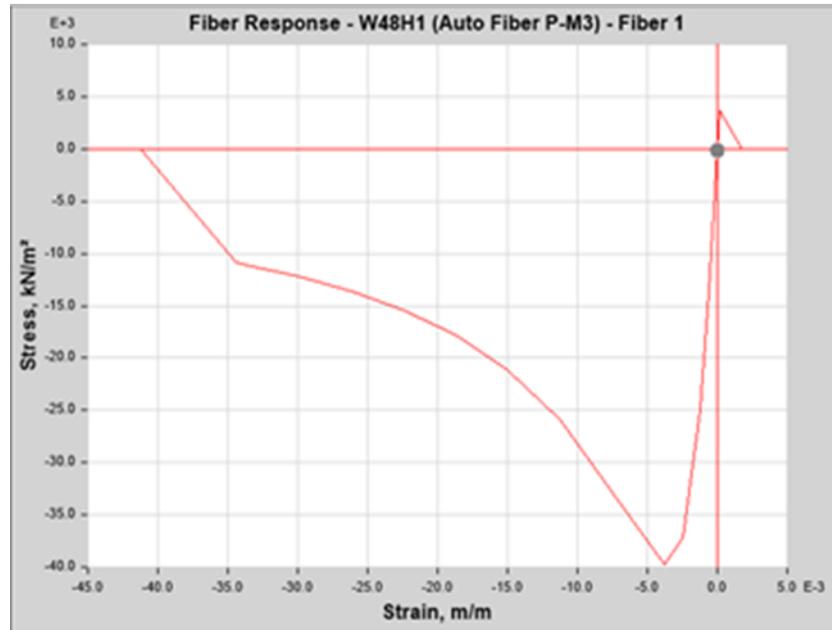
4.3.2 Concreto confinado

El concreto confinado se define de modo automático en el modelo de análisis basado en los parámetros del concreto no confinado asignados, en el modelo de Mander usado en ETABS® 2015. En la Figura 17 se presenta la gráfica de esfuerzo-deformación extraída del comportamiento de la fibra para el concreto confinado del programa en las zonas del elemento de borde. De este

modo, el programa incluye las características de confinamiento en función de la cantidad, diámetro de la barra y separación del refuerzo transversal de una sección determinada.

Figura 17.

Curva Esfuerzo-Deformación concreto confinado generado por el Etabs®2015

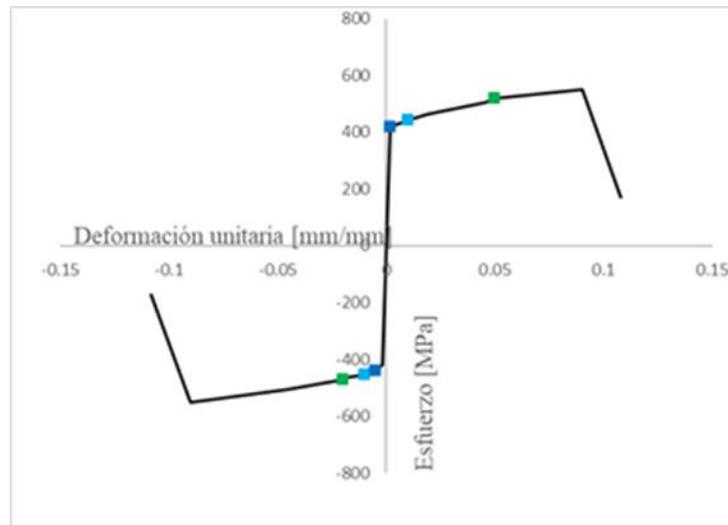


4.3.3 Acero de refuerzo

En la Figura 18 se presenta la relación esfuerzo-deformación para el acero generada en el software ETABS® 2015 que tiene incorporado los parámetros definidos por (Mander & Priestley, 1989) para el acero de refuerzo, la zona positiva representa la capacidad a tensión y la zona negativa representa la capacidad a compresión. Los parámetros de creación de la curva son: $\epsilon_{sh}=0.01$, deformación unitaria en el acero al inicio del endurecimiento por deformación; $\epsilon_{su}=0.09$, capacidad última de deformación unitaria; $\alpha=-0.10$, pendiente final.

Figura 18.

Relación Esfuerzo-Deformación del acero de refuerzo

**4.4 Modelo de rótula plástica en muros**

Se espera que la respuesta inelástica de los muros de concreto reforzado sea controlada por flexión y por tanto estos elementos serán modelados utilizando un modelo de rótula plástica de Tipo Fibra (P-M3) este modelo de rótula se encuentra en los componentes de modelación del software ETABS®2015. En la Figura 19 se presenta un ejemplo de asignación de refuerzo para una rótula en el muro, usando las características no lineales de los materiales definidos anteriormente.

El Código ASCE 41-17 en la Sección 10.3.3.1 especifican los límites de deformación unitaria permitidos para concreto a compresión y acero de refuerzo. Para concreto no confinado la deformación unitaria es 0.002 en compresión pura ó 0.005 en otras condiciones, para el caso del acero de refuerzo la máxima deformación unitaria es 0.02 en compresión y 0.05 en tensión.

Figura 19.

Ejemplo de asignación de rótula muro M-1Y

Rebar Material

Material Flexure: Barra de acero

Material Shear: Barra de acero

Bar Clear Cover: 30 mm

Layout

Geometry

| Start X (mm) | Start Y (mm) | End X (mm) | End Y (mm) | Length (mm) | Thickness (mm) | Start Zone Ratio | End Zone Ratio |
|--------------|--------------|------------|------------|-------------|----------------|------------------|----------------|
| 0 | 525 | 0 | 3830 | 3305 | 200 | 0.1664 | 0.1664 |

Reinforcement

Flexural Detail

| Station | Bar Size | Bar Spacing (mm) | Number of Bars |
|---------|----------|------------------|----------------|
| Start | #5 | 55 | 8 |
| Center | #3 | 150 | 14 |
| End | #5 | 55 | 8 |

Shear/Confinement Detail

| Station | Bar Size | Bar Spacing (mm) | Confined |
|---------|----------|------------------|----------|
| Start | #3 | 70 | Yes |
| Center | #3 | 150 | No |
| End | #3 | 70 | Yes |

Flexural Detail (Additional Individual Bar)

| Material | Distance (mm) | Area (mm ²) |
|----------|---------------|-------------------------|
| * | | |

OK Cancel

4.4.1 Longitud de rotulas plásticas en muros

Para el modelado de la rótula plástica se utilizó el software ETABS® 2015, este permite determinar la respuesta no lineal del muro sobre una altura igual a $h_w/2$ captando la respuesta elástica de la sección y posteriormente la respuesta inelástica a través de las propiedades no lineales de los materiales asignados. Según el ASCE 41-17 en la Sección 10.7.2.2.2 la longitud de rótula plástica para muros debe ser igual a 0.5 veces la altura a flexión del elemento, pero menor a la mitad de la altura de piso.

4.5 Descripción del modelo de análisis

Los modelos fueron realizados en el programa de análisis ETABS 2015®, versión V.15.20, un producto de “Computer and Structures, Inc” (ETABS,2015).

4.5.1 Modelo de análisis

El modelo de análisis está basado en la geometría de la estructura con la cual se hizo el diseño elástico, en el cual los muros estructurales se generan como elementos tipo Shell a los que se les reduce los coeficientes F_{11} , F_{22} y F_{12} a $0.35I_g$, como también se reducen los coeficientes M_{11} , M_{22} y M_{12} a $0.10I_g$ para desestimar la resistencia del elemento fuera del plano. Estos coeficientes modificadores se toman de la Tabla 10-5 del ASCE 41-17 para considerar la rigidez efectiva de los elementos y se usan para garantizar una modelación adecuada del comportamiento y mecanismo de falla ya que el concreto en el rango inelástico está fisurado. Este modelo considera la no linealidad de los materiales y simula el diafragma considerando una sección fisurada en el cual se reducen los coeficientes F_{11} , F_{22} , F_{12} , M_{11} , M_{22} y M_{12} a $0.25I_g$. Además, se incluye el caso de análisis basado en la combinación de cargas QG que corresponde a las cargas gravitacionales y se generaron varios casos de análisis con este modelo los cuales buscan reflejar una variación en efectos adicionales en el análisis. En la Tabla 30 se presentan los tipos de análisis ejecutados.

Tabla 30.*Casos de análisis ejecutados*

| Analisis estatico no lineal | Cimentación | Efecto P- Δ | Modo |
|-----------------------------|-------------|--------------------|------|
| Pushover-X1 | Rigida | No | 1 |
| Pushover-X2 | Rigida | Si | 1 |
| Pushover-X3 | Flexible | No | 1 |
| Pushover-X4 | Flexible | Si | 1 |
| Pushover-Y1 | Rigida | No | 2 |
| Pushover-Y2 | Rigida | Si | 2 |
| Pushover-Y3 | Flexible | No | 2 |
| Pushover-Y4 | Flexible | Si | 2 |

Estos modelos se ejecutan con el fin de comparar los cambios que generan en la respuesta la inclusión de cara parámetro mostrado en la Tabla anterior. Sin embargo, el desempeño de la estructura se evaluará con modelos que incorporan los efectos P- Δ y la flexibilidad de la cimentación para las direcciones X y Y.

4.5.2 Efecto de volcamiento para procedimientos no lineales

Para modelar la flexibilidad de la cimentación se escogió utilizar elementos “Área Spring” retirándose a estos elementos la capacidad de resistir tensión, dándole a la estructura la posibilidad de captar el efecto de volcamiento debido a las cargas laterales. Esto en concordancia con la Sección 7.2.8.2 del ASCE 41-17.

4.6 Selección del Procedimiento de Análisis

Se registra a continuación la revisión de las condiciones de aplicaciones del análisis estático no lineal según la Sección 7.3.2.1 del ASCE 41-17 (ASCE 41-17, 2017).

4.6.1 Relación de resistencia

La relación de resistencia $\mu_{Strength}$, es una medida de la extensión de la no linealidad, y $\mu_{m\acute{a}x}$ es una medida de la degradación del sistema. Las estructuras que experimentan demandas no lineales que exceden $\mu_{m\acute{a}x}$ tienen una degradación significativa, y por tanto se debe cambiar a un análisis dinámico no lineal para confirmar la estabilidad dinámica del edificio.

Los valores calculados de $\mu_{Strength}$ en la dirección X es 2.79 y en la dirección Y es 2.83. Los valores utilizados para determinar el $\mu_{Strength} = \frac{S_a}{V_y/W} * C_m$, donde S_a es la aceleración espectral, V_y es la resistencia de fluencia proveniente del análisis no lineal; W es el peso sísmico efectivo; $C_m=0.8$. Además, en la Sección 7.3.2.1 menciona que el valor de $\mu_{Strength}$ debe ser menor a la resistencia máxima $\mu_{M\acute{a}x}$. El valor de $\mu_{M\acute{a}x}$ calculado es 3.52 por tanto no es necesario realizar un análisis dinámico no lineal.

4.6.2 Influencia de los modos superiores

En la Sección 7.3.2.1 del ASCE 41-17 menciona que se debe revisar de la influencia de los modos superiores en la respuesta estructural con el fin de verificar que se puede realizar el análisis estático no lineal buscando una relación entre el cortante en la base considerando una participación del 90% de la masa y el cortante en la base considerando únicamente el primer modo de participación. Este procedimiento se verifica utilizando el cortante en cada uno de los pisos verificando que el modelo que requirió una mayor cantidad de modos no exceda el 130% del cortante de aquel modelo en el que solo se utilizó el primer modo de participación. Se presentan los resultados en la Tabla 31.

Tabla 31.*Influencia de los modos superiores de la estructura*

| Piso | Modo Principal | Dirección X | Relación | Modo Principal | Dirección Y | Relación |
|------|----------------|-------------|----------|----------------|-------------|----------|
| | X [kN] | N modos | [%] | Y [kN] | N modos | [%] |
| 12.0 | 781.8 | 878.1 | 112% | 851.7 | 950.9 | 112% |
| 11.0 | 1810.3 | 1976.3 | 109% | 1953.4 | 2114.4 | 108% |
| 10.0 | 2749.6 | 2921.8 | 106% | 2940.8 | 3096.7 | 105% |
| 9.0 | 3592.3 | 3723.0 | 104% | 3809.6 | 3917.4 | 103% |
| 8.0 | 4331.7 | 4400.8 | 102% | 4556.3 | 4605.4 | 101% |
| 7.0 | 4962.8 | 4981.7 | 100% | 5179.4 | 5190.9 | 100% |
| 6.0 | 5482.8 | 5486.8 | 100% | 5679.9 | 5694.6 | 100% |
| 5.0 | 5891.6 | 5923.8 | 101% | 6061.9 | 6122.2 | 101% |
| 4.0 | 6192.3 | 6284.9 | 101% | 6332.9 | 6465.6 | 102% |
| 3.0 | 6391.7 | 6553.9 | 103% | 6504.6 | 6711.7 | 103% |
| 2.0 | 6501.1 | 6717.3 | 103% | 6593.7 | 6854.4 | 104% |
| 1.0 | 6538.8 | 6778.4 | 104% | 6622.4 | 6905.7 | 104% |

5. Resultados del Análisis

5.1 Resultados análisis no lineal

Se presenta a continuación el comportamiento de la estructura bajo el análisis estático no lineal con los diferentes modelos descritos en la Tabla 30.

5.1.1 No linealidad del material y no linealidad geométrica

En la Figura 20 se presenta la respuesta de la estructura comparando los modelos de análisis Pushover-X1 y Pushover-X2 y en la Figura 21 se comparan los modelos Pushover-Y1 y Pushover-Y2. Estas dos figuras permiten diferencias de la influencia que tiene en la respuesta la inclusión

de los efectos de la no linealidad geométrica sin considerar la flexibilidad de la cimentación en los análisis no lineales.

Figura 20.

Curva de capacidad en dirección X

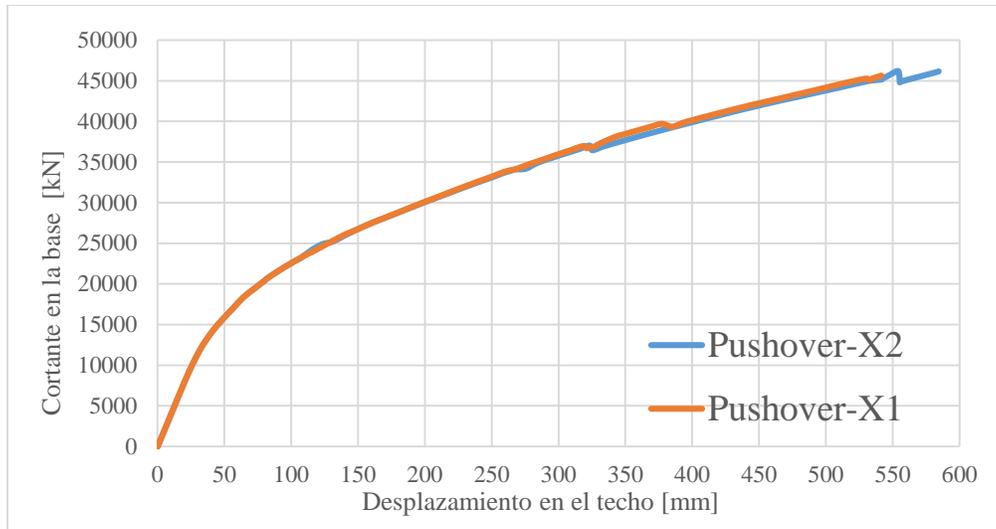
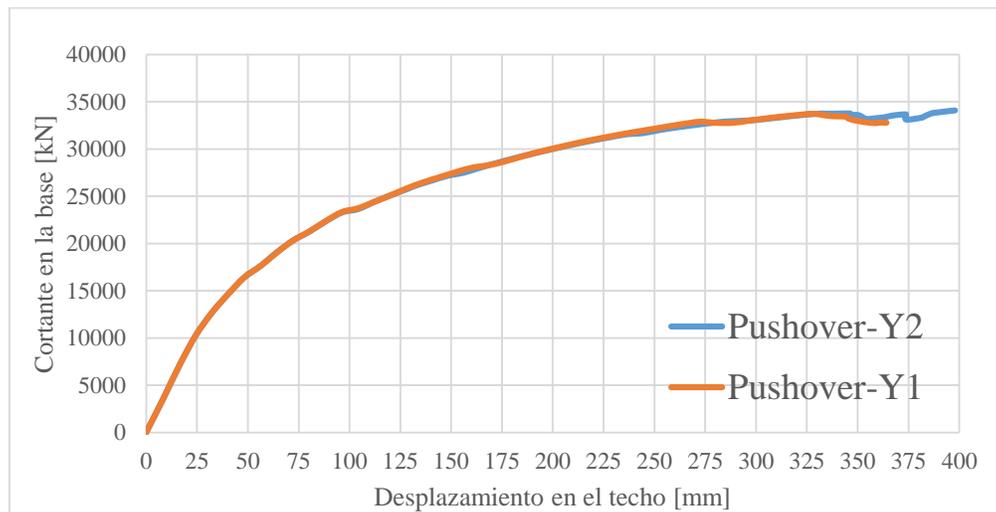


Figura 21.

Curva de capacidad en dirección Y



En las Figuras 20 y 21 se observa que al considerar el efecto P- Δ en el análisis no lineal, la estructura presenta una deformación mayor sin un aumento significativo de la fuerza como se observa en los resultados del análisis.

5.1.2 No linealidad del material, no linealidad geométrica y flexibilidad de la cimentación

En la Figura 22 se presenta la respuesta de la estructura comparando los modelos de análisis descritos en la Tabla 30 del presente documento, Pushover-X1, Pushover-X2 y Pushover-X4 y en la Figura 23 se comparan los modelos Pushover-Y1, Pushover-Y2 y Pushover-Y4. Estas tres figuras no visualizan diferencias en la influencia que tiene en la respuesta, la inclusión de los efectos de la no linealidad geométrica considerando la flexibilidad de la cimentación en los análisis no lineales.

Figura 22.

Curva de capacidad en X con flexibilidad en la cimentación

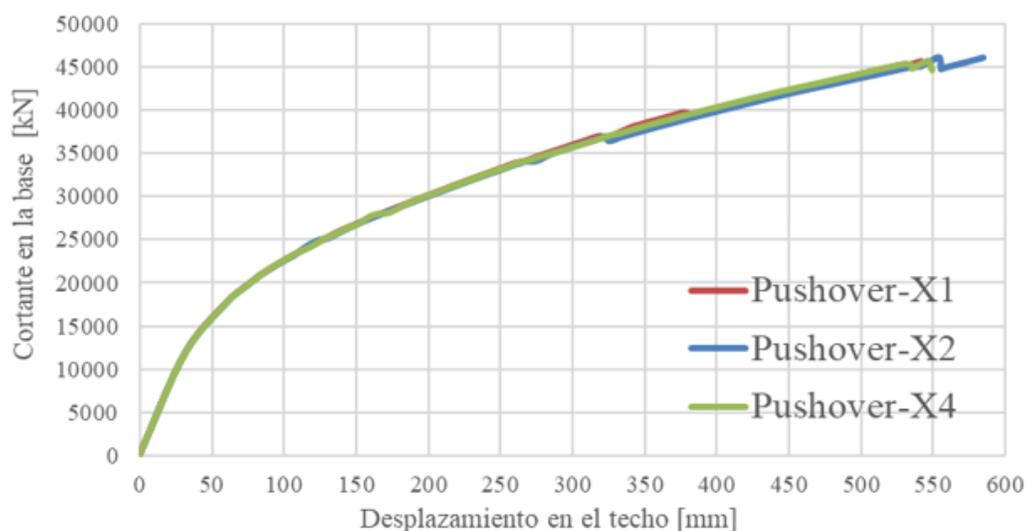
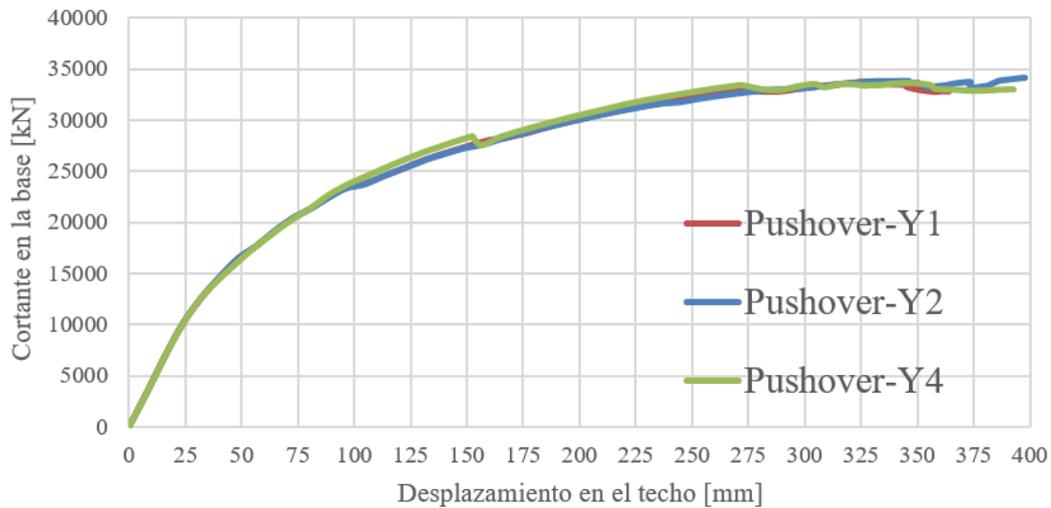


Figura 23.

Curva de capacidad en Y con flexibilidad en la cimentación



5.1.3 Desplazamiento objetivo de la estructura punto de desempeño

Para determinar el desplazamiento objetivo se utilizó la curva de capacidad extraída del análisis estático no lineal Pushover-X4 y Pushover-Y4. Para este proceso se determinan las variables descritas en la Sección 7.4.3.2 del ASCE 41-17, se define la rigidez del primer segmento de la curva bilineal idealizada y se aplica el método de los coeficientes de la Sección 7.4.3.3 del ASCE 41-17. En la Tabla 32 se presentan los parámetros calculados para determinar el desplazamiento objetivo y su cortante asociado, junto con el desplazamiento y cortante de fluencia de las curvas bilineales idealizadas.

Tabla 32.

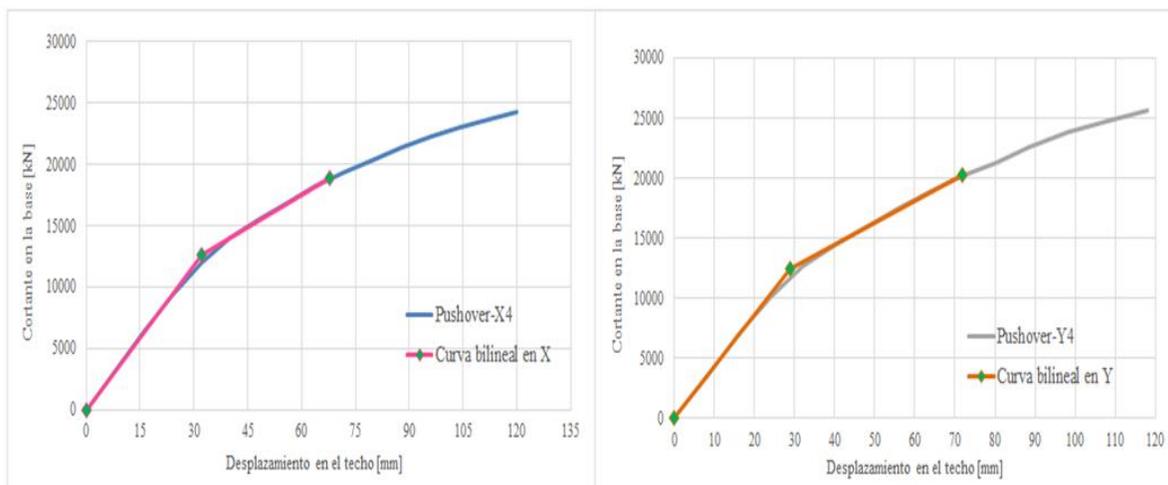
Desplazamiento objetivo para cada dirección de análisis

| Parámetros | Unidades | Dirección de análisis | |
|----------------|----------|-----------------------|-------------|
| | | Pushover-X4 | Pushover-Y4 |
| Δy | m | 0.0322 | 0.0290 |
| V_y | kN | 12633.61 | 12428.28 |
| K_i | kN/m | 427970.78 | 565973.60 |
| T_i | s | 0.399 | 0.374 |
| K_a | kN/m | 392189.34 | 428621.96 |
| T_a | s | 0.417 | 0.430 |
| a | [-] | 90.0 | 90.0 |
| C_0 | [-] | 1.50 | 1.50 |
| C_1 | [-] | 1.115 | 1.111 |
| C_2 | [-] | 1.023 | 1.023 |
| C_m | [-] | 0.80 | 0.80 |
| S_a | g | 0.918 | 0.918 |
| W | kN | 48025.83 | 48025.83 |
| μ strength | [-] | 2.792 | 2.838 |
| δ_t | m | 0.068 | 0.072 |
| V_t | kN | 18839.07 | 20222.90 |

Dado los resultados presentados en la Tabla 32, se plasma en la Figura 24 las curvas bilineales sobre la curva de capacidad para definir el punto de desempeño de la estructura calculado mediante el método de los coeficientes.

Figura 24.

Curvas bilineales en la dirección X y Y



5.2 Evaluación del desempeño estructural y evaluación de la rótulas

En la Sección 10.7.2.4.2 del ASCE41-17 se menciona que cuando los muros del sistema estructural están controlados por la flexión se deben utilizar los criterios números de la Tabla 10-19 del ASCE41-17 con la finalidad de evaluar el desempeño a través de las rotaciones máximas permitidas para cada condición de desempeño. Se pretende comparar las rotaciones obtenidas para cada muro de la modelación no lineal con las rotaciones máximas permitidas según el criterio del ASCE 41-17 para elementos dominados por la flexión, esta evaluación a nivel individual permitirá establecer unos puntos de control sobre la curva de capacidad de la estructura para evaluar el desplazamiento objetivo.

Para el presente modelo estructural se definió como objetivo básico de desempeño “Life Safety Performance (S-3), por tanto, se evaluará si la estructura cumple con este nivel de desempeño. Partiendo de los desplazamientos objetivos presentados en la Tabla 32.

Para realizar la evaluación del desempeño se presenta en las Tablas 33 y 34 la relación de las rotaciones calculadas de los muros asociadas a un nivel de desempeño básico como ocupación inmediata, seguridad de vida o colapso preventivo, además se relacionan con el desplazamiento para el cual se genera esa rotación, esto permite establecer en la curva de capacidad los límites de desempeño tomando como puntos de referencia el desplazamiento más pequeño que genera la primera rótula para cada nivel de desempeño básico.

Tabla 33.

Rotaciones asociadas a cada nivel de desempeño básico en la dirección X

| Muros Direccion X | | OI Paso | Rot. Max = 0.003 | | LS Paso | Rot. Max = 0.009 | | CP Paso | Rot. Max = 0.012 | |
|-------------------|------|---------|------------------|----------|---------|------------------|----------|---------|------------------|----------|
| | | | Δ_{Techo} | Rotación | | Δ_{Techo} | Rotación | | Δ_{Techo} | Rotación |
| M1X | W40 | 14 | 0.112 | 0.002957 | 38 | 0.294 | 0.008889 | 50 | 0.390 | 0.012121 |
| M16X | W85 | 15 | 0.120 | 0.002942 | 39 | 0.302 | 0.008988 | 50 | 0.390 | 0.011912 |
| M17X | W58 | 14 | 0.112 | 0.003017 | 37 | 0.286 | 0.009185 | 48 | 0.374 | 0.012118 |
| M2X | W45 | 15 | 0.120 | 0.003105 | 36 | 0.278 | 0.008865 | 47 | 0.366 | 0.01196 |
| M18X | W46 | 13 | 0.104 | 0.002866 | 36 | 0.278 | 0.008877 | 47 | 0.366 | 0.011919 |
| M3X | W7 | 15 | 0.120 | 0.003096 | 39 | 0.302 | 0.009003 | 50 | 0.390 | 0.01194 |
| M4X | W4 | 16 | 0.128 | 0.003038 | 41 | 0.318 | 0.009119 | 51 | 0.398 | 0.011875 |
| M19X | W10 | 13 | 0.104 | 0.003114 | 36 | 0.278 | 0.008959 | 48 | 0.374 | 0.012099 |
| M20X | W104 | 12 | 0.096 | 0.002932 | 36 | 0.278 | 0.009109 | 47 | 0.366 | 0.012085 |
| M5X | W35 | 13 | 0.104 | 0.003032 | 36 | 0.278 | 0.009123 | 47 | 0.366 | 0.012081 |
| M6X | W91 | 13 | 0.104 | 0.002972 | 36 | 0.278 | 0.008945 | 48 | 0.374 | 0.01212 |
| M22X | W5 | 15 | 0.120 | 0.002959 | 37 | 0.286 | 0.009104 | 47 | 0.366 | 0.011942 |
| M21X | W36 | 13 | 0.104 | 0.003052 | 35 | 0.270 | 0.008883 | 47 | 0.366 | 0.012098 |
| M7X | W54 | 18 | 0.144 | 0.002961 | 45 | 0.350 | 0.009098 | 56 | 0.438 | 0.011976 |
| M8X | W53 | 15 | 0.120 | 0.002974 | 41 | 0.318 | 0.008995 | 54 | 0.422 | 0.011997 |
| M9X | W55 | 15 | 0.120 | 0.002963 | 40 | 0.310 | 0.008956 | 52 | 0.406 | 0.01199 |
| M23X | W27 | 20 | 0.160 | 0.003117 | 44 | 0.342 | 0.00899 | 55 | 0.430 | 0.0119 |
| M24X | W28 | 15 | 0.120 | 0.002912 | 42 | 0.326 | 0.009096 | 54 | 0.422 | 0.012111 |
| M25X | W32 | 14 | 0.112 | 0.002927 | 41 | 0.318 | 0.009121 | 53 | 0.414 | 0.012077 |
| M10X | W29 | 12 | 0.096 | 0.002863 | 35 | 0.270 | 0.009046 | 46 | 0.358 | 0.012029 |
| M11X | W94 | 13 | 0.104 | 0.00306 | 35 | 0.270 | 0.008877 | 47 | 0.366 | 0.012113 |
| M26X | W18 | 15 | 0.120 | 0.003055 | 36 | 0.278 | 0.009076 | 46 | 0.358 | 0.011943 |
| M27X | W30 | 13 | 0.104 | 0.00309 | 35 | 0.270 | 0.009084 | 46 | 0.358 | 0.012066 |
| M12X | W19 | 14 | 0.112 | 0.003077 | 37 | 0.286 | 0.008907 | 48 | 0.374 | 0.01186 |
| M13X | W13 | 13 | 0.104 | 0.002985 | 35 | 0.270 | 0.009124 | 45 | 0.350 | 0.011867 |
| M20X | W12 | 13 | 0.104 | 0.003007 | 36 | 0.278 | 0.009037 | 47 | 0.366 | 0.012018 |
| M29X | W103 | 12 | 0.096 | 0.003121 | 34 | 0.262 | 0.008888 | 46 | 0.358 | 0.012101 |
| M14X | W14 | 14 | 0.112 | 0.003077 | 35 | 0.270 | 0.00906 | 45 | 0.350 | 0.011926 |
| M30X | W1 | 13 | 0.104 | 0.003067 | 35 | 0.270 | 0.008981 | 46 | 0.358 | 0.012067 |
| M15X | W34 | 13 | 0.104 | 0.003058 | 36 | 0.278 | 0.00912 | 46 | 0.358 | 0.011926 |
| M31X | W3 | 13 | 0.104 | 0.002994 | 34 | 0.262 | 0.008998 | 45 | 0.350 | 0.012109 |

Tabla 34.

Rotaciones asociadas a cada nivel de desempeño básico en la dirección Y

| Muros Direccion Y | | OI Paso | Rot. Max = 0.003 | | LS Paso | Rot. Max = 0.009 | | CP Paso | Rot. Max = 0.012 | |
|-------------------|------|---------|------------------|----------|---------|------------------|----------|---------|------------------|----------|
| | | | Δ_{Techo} | Rotación | | Δ_{Techo} | Rotación | | Δ_{Techo} | Rotación |
| M1Y | W20 | 11 | 0.088 | 0.002935 | 26 | 0.204 | 0.00915 | 36 | 0.280 | 0.011580 |
| M2Y | W39 | 12 | 0.096 | 0.002960 | 28 | 0.220 | 0.00919 | 35 | 0.272 | 0.011600 |
| M3Y | W6 | 13 | 0.098 | 0.002969 | 28 | 0.220 | 0.00878 | 37 | 0.288 | 0.011900 |
| M4Y | W23 | 14 | 0.109 | 0.003063 | 31 | 0.244 | 0.008927 | 40 | 0.308 | 0.011866 |
| M5Y | W16 | 15 | 0.118 | 0.003022 | 35 | 0.272 | 0.009004 | 47 | 0.340 | 0.012031 |
| M6Y | W42 | 15 | 0.118 | 0.002982 | 36 | 0.280 | 0.008928 | 49 | 0.356 | 0.012008 |
| M7Y | W24 | 15 | 0.118 | 0.002830 | 38 | 0.296 | 0.009084 | 53 | 0.382 | 0.012141 |
| M8Y | W11 | 16 | 0.130 | 0.002858 | 47 | 0.340 | 0.009071 | 60 | 0.393 | 0.010323 |
| M9Y | W41 | 17 | 0.144 | 0.002920 | 40 | 0.308 | 0.008930 | 60 | 0.393 | 0.010323 |
| M10Y | W86 | 21 | 0.164 | 0.002922 | 40 | 0.308 | 0.008930 | 60 | 0.3960 | 0.010323 |
| M11Y | W43 | 13 | 0.098 | 0.002988 | 27 | 0.212 | 0.009016 | 35 | 0.272 | 0.011899 |
| M12Y | W84 | 12 | 0.096 | 0.003034 | 27 | 0.212 | 0.008957 | 36 | 0.280 | 0.011925 |
| M13Y | W83 | 14 | 0.109 | 0.003136 | 30 | 0.236 | 0.009076 | 38 | 0.296 | 0.011926 |
| M14Y | W95 | 15 | 0.118 | 0.003163 | 33 | 0.260 | 0.009129 | 42 | 0.324 | 0.011987 |
| M15Y | W31 | 16 | 0.130 | 0.002957 | 40 | 0.308 | 0.008930 | 60 | 0.393 | 0.011813 |
| M16Y | W15 | 17 | 0.144 | 0.003143 | 49 | 0.356 | 0.009057 | 60 | 0.393 | 0.009868 |
| M17Y | W37 | 17 | 0.144 | 0.003039 | 40 | 0.308 | 0.008930 | 60 | 0.393 | 0.010323 |
| M18Y | W38 | 24 | 0.144 | 0.002985 | 40 | 0.308 | 0.008930 | 60 | 0.393 | 0.010323 |
| M19Y | W44 | 14 | 0.109 | 0.003171 | 29 | 0.228 | 0.009121 | 36 | 0.280 | 0.011955 |
| M20Y | W102 | 26 | 0.204 | 0.002926 | 30 | 0.236 | 0.009076 | 38 | 0.296 | 0.011926 |
| M21Y | W93 | 14 | 0.109 | 0.003235 | 25 | 0.196 | 0.008855 | 32 | 0.252 | 0.011930 |
| M22Y | W33 | 12 | 0.096 | 0.002950 | 28 | 0.220 | 0.008899 | 37 | 0.288 | 0.012400 |
| M23Y | W17 | 14 | 0.109 | 0.003065 | 31 | 0.244 | 0.009144 | 38 | 0.296 | 0.011918 |
| M24Y | W21 | 14 | 0.109 | 0.002975 | 32 | 0.252 | 0.008942 | 41 | 0.316 | 0.011868 |
| M25Y | W25 | 15 | 0.118 | 0.002971 | 34 | 0.268 | 0.008946 | 45 | 0.331 | 0.012086 |
| M26Y | W26 | 16 | 0.130 | 0.003116 | 37 | 0.288 | 0.008944 | 50 | 0.358 | 0.011874 |
| M27Y | W22 | 19 | 0.152 | 0.003082 | 39 | 0.304 | 0.008980 | 56 | 0.392 | 0.012041 |
| M28Y | W2 | 17 | 0.144 | 0.002996 | 50 | 0.358 | 0.008934 | 60 | 0.356 | 0.012041 |
| M29Y | W8 | 18 | 0.152 | 0.003047 | 31 | 0.244 | 0.009144 | 60 | 0.393 | 0.010323 |
| M30Y | W99 | 25 | 0.196 | 0.003083 | 31 | 0.244 | 0.009144 | 60 | 0.356 | 0.011987 |

Con base en las Tablas 33 y 34 se realizan la Figuras 25 y 26 estableciendo para la curva de capacidad de la estructura los puntos de Ocupación Inmediata (OI), Seguridad de Vida (LS) y Colapso Preventivo (CP), además se puede visualizar para cada dirección de análisis el punto de desempeño calculado por el método de los coeficientes presentado en la Tabla 32.

Figura 25.

Curva de capacidad dirección X con niveles básicos de desempeño

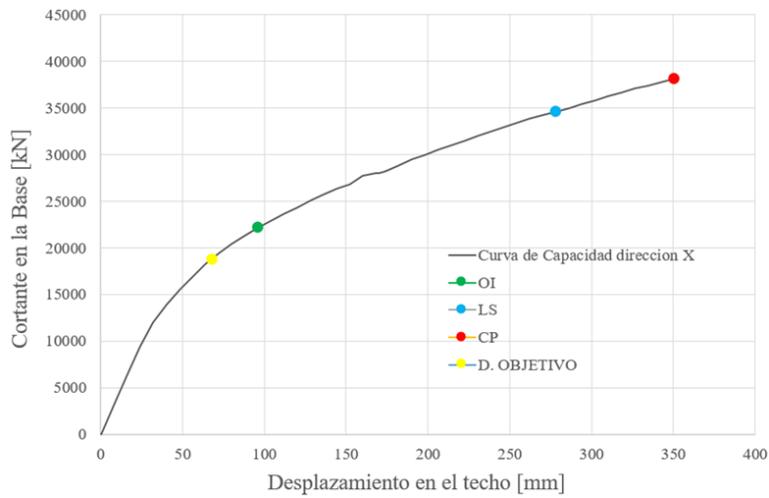
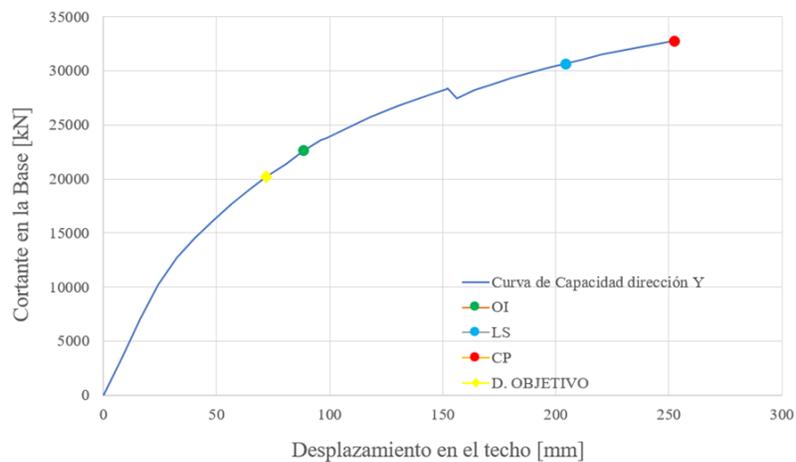


Figura 26.

Curva de capacidad dirección Y con niveles básicos de desempeño

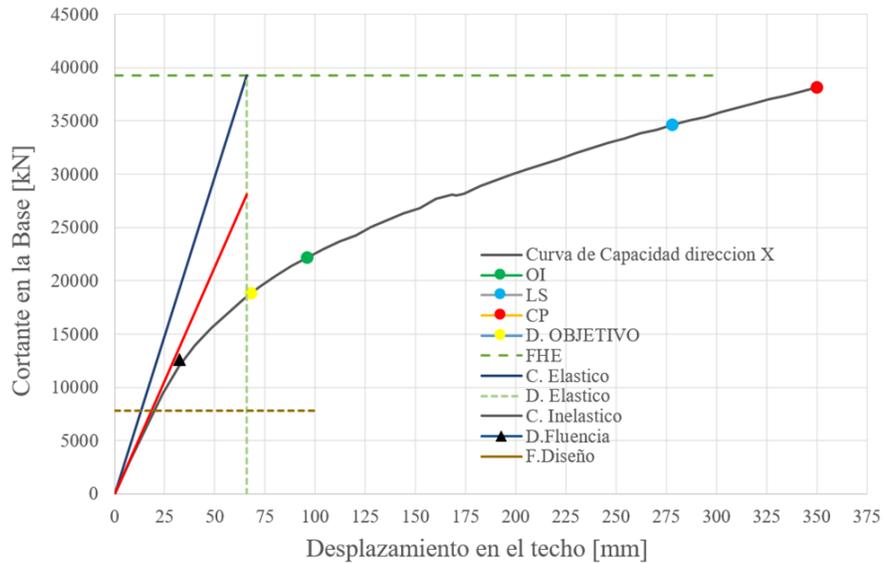


5.3 Análisis de la respuesta elástica e inelástica

Según la NSR-10 en la Sección 3.7.1 el coeficiente de disipación de energía básico para el sistema de muros de concreto reforzado (DES) es $R_o=5$, este coeficiente permite determinar la reducción de la fuerza sísmica para la estructura con el supuesto que ella entrará en el rango no lineal y disipará energía a través de la deformación. El objetivo de este coeficiente es considerar la demanda de ductilidad y la sobre resistencia de la estructura.

Los parámetros de desempeño están basados en el principio de desplazamiento equivalente, el cual establece que el desplazamiento de un sistema inelástico sujeto a un movimiento particular del suelo es igual al desplazamiento del sistema respondiendo elásticamente. En las Figuras 29 y 30 se presentan los parámetros calculados para la dirección X y Y.

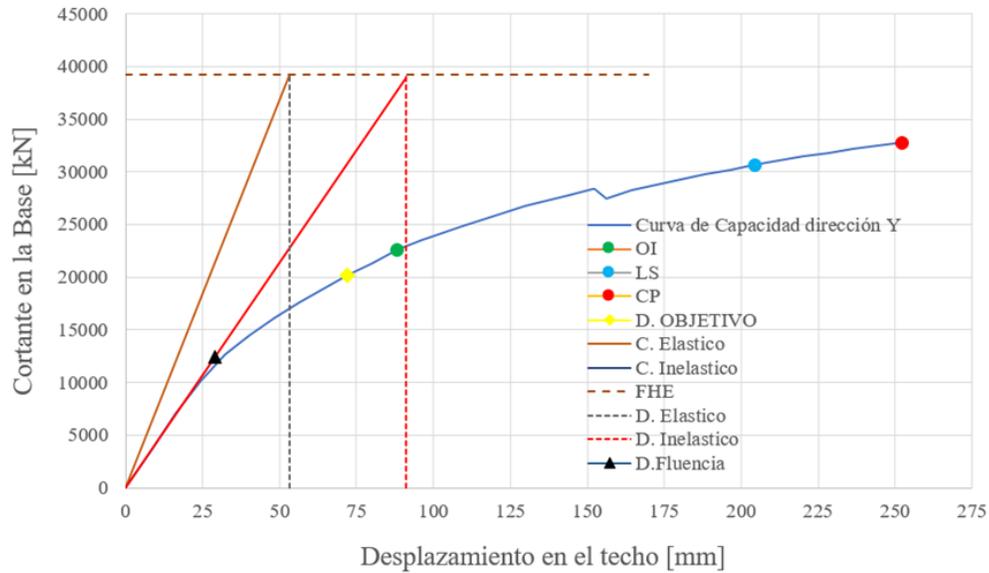
En estas Figuras se presenta las líneas de la respuesta elástica y la respuesta inelástica planteada como la proyección del comportamiento en la zona elástica de la curva de capacidad. La recta elástica (C. Elástico) representa la rigidez inicial de la respuesta elástica considerando las secciones no fisuradas, y la recta inelástica (C. Inelástica) representa la rigidez inicial del modelo no lineal en el rango elástico. Además, se plantean sobre la curva de capacidad los puntos de desempeño, el desplazamiento objetivo y el desplazamiento de fluencia.

Figura 27.*Parámetros de desempeño en la dirección X*

Como se puede observar en las Figuras 27 y 28 la proyección vertical del punto de encuentro entre la línea de la rigidez inelástica y la horizontal que representa la fuerza elástica para la revisión de derivas, no coincide con el desplazamiento objetivo. Esto puede atribuirse a la proyección elástica del comportamiento, sin embargo, no se considera en esta proyección la capacidad de rotación de los muros acorde a su geometría y distribución de refuerzo, netamente la proyección elástica de la curva de capacidad.

Figura 28.

Parámetros de desempeño dirección Y



Según los datos presentados en la Tabla 35 la estructura posee una ductilidad de desplazamiento de 2.11 en la dirección X y 2.48 en la dirección Y lo cual es mucho menor al asumido en la etapa de diseño elástico. Además, se puede verificar que se cumple el principio de desplazamiento equivalente ya que el desplazamiento objetivo en las direcciones de análisis es cercano al desplazamiento obtenido en la etapa de diseño inicial.

Tabla 35.*Parámetros de desempeño*

| Parametros | Unidades | Direccion X | Direccion Y |
|-------------------------------------------|----------|-------------|-------------|
| Fuerza Elastica de demanda | kN | 39239.11 | 39239.11 |
| Desplazamiento elastico | mm | 65.7 | 53.2 |
| Fuerza Inelastica de demanda proyectada | kN | 39239.11 | 39239.11 |
| Desplazamiento inelastico proyectado | mm | 91 | 91 |
| Fuerza inelastica desplazamiento objetivo | kN | 18839.07 | 20222.9 |
| Desplazamiento Objetivo | mm | 68 | 72 |
| Fuerza de fluencia | kN | 12633.61 | 12428.28 |
| Desplazamiento de fluencia | mm | 32.2 | 29 |
| Ductilidad del sistema | [-] | 2.11 | 2.48 |

Estos resultados no deben generalizarse ya que se encuentran limitados por las características de análisis, modelo y diseño asumidos en este estudio considerando aspectos como configuración geométrica de la estructura, suposiciones en la modelación (materiales, condiciones de apoyo, secciones no fisuradas, tipo de diafragma y el modelado de la no linealidad de los materiales) el nivel de cargas asignadas y la demanda sísmica seleccionada.

6. Revisión de los Elementos Primarios

En esta sección se hace la revisión de los resultados del análisis estático no lineal, considerando a los muros de concreto reforzado como elementos primarios, ya que se busca obtener una falla a flexión dúctil en la base, se debe evitar una falla del muro por cortante. Los ajustes de los elementos primarios se ajustan a las recomendaciones del código de diseño ACI 318-19 (ACI 318,2019).

6.1 Chequeo del cortante en los muros para el análisis estático no-lineal

Para garantizar que el elemento presente una falla dúctil, dominada por la flexión se deben inhibir los demás tipos de falla frágiles, por tanto, se deben verificar la fuerza cortante en los muros en el punto donde se presenta el desplazamiento objetivo para cada dirección de análisis.

En las siguientes tablas se presenta la revisión realizada comparando la capacidad a cortante suministrada con el acero de diseño con la demanda inelástica de cortante, en caso que el muro requiera reforzamiento se registra el cambio del refuerzo en las Tablas 36 y 37, para cada dirección de análisis.

Tabla 36.

Corrección de refuerzo a cortante dirección X

| Muros | fc | h | Lw | Pu | Mu | Vu | Av Suministrado | ØVn | ØVn > Vu | Av Corregido | ØVn | ØVn > Vu | |
|-------------|------|----|------|------|----------|---------|-----------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------|
| Dirección X | MPa | m | m | kN | kN-m | kN | | kN | | | kN | | |
| M-1X | W40 | 28 | 0.15 | 2.10 | -814.47 | 1686.00 | 418.78 | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple |
| M-2X | W45 | 28 | 0.15 | 1.85 | -1444.62 | 1506.10 | 486.58 | 1 N 3 C/ 0.20 | 480.78 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 591.11 | Cumple |
| M-3X | W7 | 28 | 0.15 | 3.15 | -471.63 | 3319.50 | 873.00 | 1 N 3 C/ 0.30 | 630.76 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 1006.49 | Cumple |
| M-4X | W4 | 28 | 0.15 | 1.65 | -2555.11 | 1258.20 | 510.07 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 527.21 | Cumple |
| M-5X | W35 | 28 | 0.15 | 1.90 | -101.25 | 1033.36 | 292.80 | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple |
| M-6X | W91 | 28 | 0.15 | 1.65 | 1109.91 | 267.65 | 210.40 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple |
| M-7X | W54 | 28 | 0.15 | 2.95 | -3624.96 | 4728.17 | 1893.73 | 1 N 3 C/ 0.30 | 590.71 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.06 | 1998.21 | Cumple |
| M-8X | W53 | 28 | 0.15 | 2.60 | 1153.10 | 1365.00 | 1041.20 | 1 N 3 C/ 0.30 | 520.62 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.11 | 1056.30 | Cumple |
| M-9X | W55 | 28 | 0.15 | 2.95 | 1465.58 | 1122.00 | 790.60 | 1 N 3 C/ 0.25 | 661.08 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 942.58 | Cumple |
| M-10X | W29 | 28 | 0.15 | 1.90 | -64.18 | 947.61 | 273.50 | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple |
| M-11X | W94 | 28 | 0.15 | 1.65 | 1110.75 | 265.21 | 208.50 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple |
| M-12X | W19 | 28 | 0.15 | 3.15 | -80.12 | 2771.00 | 800.09 | 1 N 3 C/ 0.30 | 630.76 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.20 | 818.62 | Cumple |
| M-13X | W13 | 28 | 0.15 | 1.65 | -1512.22 | 1307.40 | 493.80 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 527.21 | Cumple |
| M-14X | W14 | 28 | 0.15 | 1.85 | -1592.92 | 1580.00 | 510.60 | 1 N 3 C/ 0.20 | 480.78 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 591.11 | Cumple |
| M-15X | W34 | 28 | 0.15 | 2.10 | -534.54 | 1600.00 | 395.87 | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple |
| M-16X | W85 | 28 | 0.15 | 2.40 | -611.60 | 2252.53 | 837.02 | 1 N 3 C/ 0.20 | 623.71 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.12 | 909.98 | Cumple |
| M-17X | W58 | 28 | 0.15 | 2.10 | -468.70 | 1518.30 | 384.37 | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple |
| M-18X | W46 | 28 | 0.15 | 1.85 | 197.87 | 897.50 | 326.50 | 1 N 3 C/ 0.20 | 480.78 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 480.78 | Cumple |
| M-19X | W10 | 28 | 0.15 | 1.65 | 778.80 | 187.85 | 133.70 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple |
| M-20X | W104 | 28 | 0.15 | 3.15 | 1377.30 | 220.40 | 61.00 | 1 N 3 C/ 0.30 | 630.76 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 630.76 | Cumple |
| M-21X | W36 | 28 | 0.15 | 1.90 | -311.20 | 1173.30 | 318.11 | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple |
| M-22X | W5 | 28 | 0.15 | 1.65 | -4630.97 | 1558.50 | 482.00 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 527.21 | Cumple |
| M-23X | W27 | 28 | 0.15 | 2.95 | -5409.73 | 4537.40 | 1948.84 | 1 N 3 C/ 0.25 | 661.08 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.06 | 1998.21 | Cumple |
| M-24X | W28 | 28 | 0.15 | 2.60 | 556.10 | 2727.47 | 1569.50 | 1 N 3 C/ 0.20 | 520.62 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.06 | 1761.14 | Cumple |
| M-25X | W32 | 28 | 0.15 | 2.95 | 1602.06 | 1252.01 | 832.52 | 1 N 3 C/ 0.30 | 590.71 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 942.58 | Cumple |
| M-26X | W18 | 28 | 0.15 | 1.65 | -4759.65 | 1181.85 | 488.20 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 527.21 | Cumple |
| M-27X | W30 | 28 | 0.15 | 1.90 | -476.80 | 1263.81 | 344.10 | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 493.77 | Cumple |
| M-28X | W12 | 28 | 0.15 | 1.65 | -466.15 | 616.69 | 297.77 | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 428.80 | Cumple |
| M-29X | W103 | 28 | 0.15 | 3.15 | -915.66 | 882.95 | 56.00 | 1 N 3 C/ 0.30 | 630.76 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 630.76 | Cumple |
| M-30X | W1 | 28 | 0.15 | 1.85 | -262.50 | 855.10 | 320.00 | 1 N 3 C/ 0.20 | 480.78 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 480.78 | Cumple |
| M-31X | W3 | 28 | 0.15 | 2.10 | -823.38 | 1761.95 | 437.00 | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 545.75 | Cumple |

Tabla 37.*Corrección de refuerzo a cortante dirección Y*

| Muros Dirección Y | fc MPa | h m | Lw m | Pu kN | Mu kN-m | Vu kN | Av Suministrado | ØVn kN | ØVn > Vu | Av Corregido | ØVn kN | ØVn > Vu | |
|----------------------|-----------|--------|---------|----------|------------|----------|-----------------|---------------|----------|--------------|---------------|----------|--------|
| M-1Y | W20 | 28 | 0.20 | 3.00 | 2240.50 | 162.80 | 113.13 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1039.52 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1039.52 | Cumple |
| M-2Y | W39 | 28 | 0.15 | 2.85 | -16.92 | 1707.67 | 221.95 | 1 N 3 C/ 0.20 | 910.63 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 910.63 | Cumple |
| M-3Y | W6 | 28 | 0.15 | 4.00 | 109.54 | 3123.20 | 298.70 | 1 N 3 C/ 0.30 | 960.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 960.00 | Cumple |
| M-4Y | W23 | 28 | 0.15 | 2.00 | -466.52 | 1279.22 | 236.86 | 1 N 3 C/ 0.20 | 639.04 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 639.04 | Cumple |
| M-5Y | W16 | 28 | 0.20 | 6.00 | 948.43 | 7780.05 | 866.10 | 1 N 3 C/ 0.20 | 2079.04 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 2079.04 | Cumple |
| M-6Y | W42 | 28 | 0.20 | 6.00 | 2168.60 | 4000.00 | 295.39 | 1 N 3 C/ 0.20 | 2079.04 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 2079.04 | Cumple |
| M-7Y | W24 | 28 | 0.15 | 2.00 | -358.69 | 1164.63 | 227.57 | 1 N 3 C/ 0.20 | 639.04 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 639.04 | Cumple |
| M-8Y | W11 | 28 | 0.15 | 4.00 | -324.99 | 3840.02 | 451.08 | 1 N 3 C/ 0.30 | 960.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 960.00 | Cumple |
| M-9Y | W41 | 28 | 0.15 | 2.85 | -720.70 | 2452.43 | 438.87 | 1 N 3 C/ 0.20 | 910.63 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 910.63 | Cumple |
| M-10Y | W86 | 28 | 0.20 | 3.00 | 2166.90 | 241.10 | 120.58 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1039.52 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1039.52 | Cumple |
| M-11Y | W43 | 28 | 0.20 | 3.10 | 2044.16 | 2066.28 | 1369.36 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1074.17 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.10 | 1813.71 | Cumple |
| M-12Y | W84 | 28 | 0.15 | 2.80 | -237.50 | 2052.47 | 360.12 | 1 N 3 C/ 0.20 | 894.66 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 894.66 | Cumple |
| M-13Y | W83 | 28 | 0.15 | 4.50 | -1369.74 | 6942.20 | 829.08 | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple |
| M-14Y | W95 | 28 | 0.15 | 4.50 | -776.90 | 6283.80 | 974.00 | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple |
| M-15Y | W31 | 28 | 0.15 | 4.50 | -886.58 | 6218.37 | 930.40 | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple |
| M-16Y | W15 | 28 | 0.15 | 4.50 | -1221.81 | 6528.80 | 799.30 | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 1080.00 | Cumple |
| M-17Y | W37 | 28 | 0.15 | 2.80 | -342.43 | 2037.30 | 350.20 | 1 N 3 C/ 0.20 | 894.66 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 894.66 | Cumple |
| M-18Y | W38 | 28 | 0.20 | 3.10 | 2113.10 | 125.33 | 56.61 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1074.17 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1074.17 | Cumple |
| M-19Y | W44 | 28 | 0.20 | 3.10 | -456.86 | 5316.87 | 1765.85 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1074.17 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.10 | 1813.71 | Cumple |
| M-20Y | W102 | 28 | 0.20 | 3.10 | -2533.13 | 4930.60 | 1552.04 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1074.17 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.10 | 1813.71 | Cumple |
| M-21Y | W93 | 28 | 0.20 | 3.00 | -12762.31 | 6524.42 | 1504.60 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1039.52 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.10 | 1755.20 | Cumple |
| M-22Y | W33 | 28 | 0.20 | 2.85 | 346.43 | 1639.34 | 473.23 | 1 N 3 C/ 0.20 | 987.54 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 987.54 | Cumple |
| M-23Y | W17 | 28 | 0.15 | 4.00 | -3284.49 | 7728.90 | 977.47 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple |
| M-24Y | W21 | 28 | 0.15 | 4.00 | -904.29 | 1539.24 | 306.30 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple |
| M-25Y | W25 | 28 | 0.15 | 4.00 | -3508.23 | 7738.51 | 900.70 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple |
| M-26Y | W26 | 28 | 0.15 | 4.00 | -3086.50 | 7196.94 | 896.60 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 1278.08 | Cumple |
| M-27Y | W22 | 28 | 0.15 | 2.00 | -933.50 | 1437.61 | 299.82 | 1 N 3 C/ 0.20 | 639.04 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 639.04 | Cumple |
| M-28Y | W2 | 28 | 0.15 | 4.00 | -2581.60 | 6407.38 | 871.10 | 1 N 3 C/ 0.30 | 960.00 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.30 | 960.00 | Cumple |
| M-29Y | W8 | 28 | 0.15 | 2.85 | 116.40 | 1844.20 | 465.70 | 1 N 3 C/ 0.20 | 910.63 | Cumple | 1 N 3 C/ 0.20 | 910.63 | Cumple |
| M-30Y | W99 | 28 | 0.20 | 3.00 | -9043.60 | 4429.90 | 1064.78 | 1 N 3 C/ 0.20 | 1039.52 | Reforzar | 1 N 3 C/ 0.15 | 1278.08 | Cumple |

6.2 Revisión del espesor del muro

En la Sección 11.3.1 del ACI 31-19 se establece un espesor mínimo para muros portantes entre 100mm y 1/25 de la longitud menor entre la altura del muro y la longitud no apoyada. De acuerdo a esto, el espesor mínimo sería 100mm, todos los muros tienen un espesor superior a este valor de acuerdo a lo presentado en las Tablas 36 y 37, cumpliendo con este requisito.

6.3 Revisión del elemento de borde

En la Sección 18.10.6.4 del ACI 318-19 se establece un espesor mínimo para los elementos de borde de $h_u/16$, siendo h_u la longitud lateral no soportada en la fibra extrema a compresión del muro. Se toma h_u como la altura de entrepiso, o que nos arroja un espesor mínimo de 150mm. De acuerdo con las Tablas 38 y 39 no es necesario incrementar ningún elemento de borde.

En las Tablas 38 y 39 se chequea la longitud del elemento de borde de acuerdo al literal C de la Sección 18.10.6.4 del ACI 318-19, en la cual el elemento de borde debe ser mayor o igual a 300mm para muros con relación de aspecto h_w/l_w mayor a 2 y con c/l_w mayor a $3/8$, para el modelo analizado esta condición no aplica.

Tabla 38.

Revisión de espesor del elemento de borde dirección X

| Muros Dirección X | h m | L _w m | h _w m | h _w /L _w [-] | C m | C/L _w [-] | Chequeo | |
|-------------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|-------------------------|---------|-----------|
| M-1X | W40 | 0.15 | 2.10 | 30.24 | 14.40 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-2X | W45 | 0.15 | 1.85 | 30.24 | 16.35 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-3X | W7 | 0.15 | 3.15 | 30.24 | 9.60 | 0.55 | 1/8 | No Aplica |
| M-4X | W4 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-5X | W35 | 0.15 | 1.90 | 30.24 | 15.92 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-6X | W91 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-7X | W54 | 0.15 | 2.95 | 30.24 | 10.25 | 0.90 | 2/8 | No Aplica |
| M-8X | W53 | 0.15 | 2.60 | 30.24 | 11.63 | 0.60 | 2/8 | No Aplica |
| M-9X | W55 | 0.15 | 2.95 | 30.24 | 10.25 | 0.90 | 2/8 | No Aplica |
| M-10X | W29 | 0.15 | 1.90 | 30.24 | 15.92 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-11X | W94 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-12X | W19 | 0.15 | 3.15 | 30.24 | 9.60 | 0.55 | 1/8 | No Aplica |
| M-13X | W13 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-14X | W14 | 0.15 | 1.85 | 30.24 | 16.35 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-15X | W34 | 0.15 | 2.10 | 30.24 | 14.40 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-16X | W85 | 0.15 | 2.40 | 30.24 | 12.60 | 0.60 | 2/8 | No Aplica |
| M-17X | W58 | 0.15 | 2.10 | 30.24 | 14.40 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-18X | W46 | 0.15 | 1.85 | 30.24 | 16.35 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-19X | W10 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-20X | W104 | 0.15 | 3.15 | 30.24 | 9.60 | 0.55 | 1/8 | No Aplica |
| M-21X | W36 | 0.15 | 1.90 | 30.24 | 15.92 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-22X | W5 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-23X | W27 | 0.15 | 2.95 | 30.24 | 10.25 | 0.90 | 2/8 | No Aplica |
| M-24X | W28 | 0.15 | 2.60 | 30.24 | 11.63 | 0.60 | 2/8 | No Aplica |
| M-25X | W32 | 0.15 | 2.95 | 30.24 | 10.25 | 0.90 | 2/8 | No Aplica |
| M-26X | W18 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |
| M-27X | W30 | 0.15 | 1.90 | 30.24 | 15.92 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-28X | W12 | 0.15 | 1.65 | 30.24 | 18.33 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-29X | W103 | 0.15 | 3.15 | 30.24 | 9.60 | 0.55 | 1/8 | No Aplica |
| M-30X | W1 | 0.15 | 1.85 | 30.24 | 16.35 | 0.60 | 3/8 | No Aplica |
| M-31X | W3 | 0.15 | 2.10 | 30.24 | 14.40 | 0.50 | 2/8 | No Aplica |

Tabla 39.*Revisión de espesor del elemento de borde dirección Y*

| Muros | Dirección Y | h m | L _w m | h _w m | h _w /L _w [-] | C m | C/L _w [-] | Chequeo |
|--------------------|-------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|--------|-------------------------|-----------|
| M- ₁ Y | W20 | 0.20 | 3.00 | 30.24 | 10.08 | 1.1 | 3/8 | No Aplica |
| M- ₂ Y | W39 | 0.15 | 2.85 | 30.24 | 10.61 | 0.6 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₃ Y | W6 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₄ Y | W23 | 0.15 | 2.00 | 30.24 | 15.12 | 0.6 | 2/7 | No Aplica |
| M- ₅ Y | W16 | 0.20 | 6.00 | 30.24 | 5.04 | 1.2 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₆ Y | W42 | 0.20 | 6.00 | 30.24 | 5.04 | 1.2 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₇ Y | W24 | 0.15 | 2.00 | 30.24 | 15.12 | 0.6 | 2/7 | No Aplica |
| M- ₈ Y | W11 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₉ Y | W41 | 0.15 | 2.85 | 30.24 | 10.61 | 0.6 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₁₀ Y | W86 | 0.20 | 3.00 | 30.24 | 10.08 | 1.1 | 3/8 | No Aplica |
| M- ₁₁ Y | W43 | 0.20 | 3.10 | 30.24 | 9.75 | 1.1 | 1/3 | No Aplica |
| M- ₁₂ Y | W84 | 0.15 | 2.80 | 30.24 | 10.80 | 0.5 | 1/6 | No Aplica |
| M- ₁₃ Y | W83 | 0.15 | 4.50 | 30.24 | 6.72 | 0.9 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₁₄ Y | W95 | 0.15 | 4.50 | 30.24 | 6.72 | 1.2 | 1/4 | No Aplica |
| M- ₁₅ Y | W31 | 0.15 | 4.50 | 30.24 | 6.72 | 1.2 | 1/4 | No Aplica |
| M- ₁₆ Y | W15 | 0.15 | 4.50 | 30.24 | 6.72 | 1.2 | 1/4 | No Aplica |
| M- ₁₇ Y | W37 | 0.15 | 2.80 | 30.24 | 10.80 | 0.9 | 1/3 | No Aplica |
| M- ₁₈ Y | W38 | 0.20 | 3.10 | 30.24 | 9.75 | 0.5 | 1/6 | No Aplica |
| M- ₁₉ Y | W44 | 0.20 | 3.10 | 30.24 | 9.75 | 1.1 | 1/3 | No Aplica |
| M- ₂₀ Y | W102 | 0.20 | 3.10 | 30.24 | 9.75 | 1.1 | 1/3 | No Aplica |
| M- ₂₁ Y | W93 | 0.20 | 3.00 | 30.24 | 10.08 | 1.1 | 3/8 | No Aplica |
| M- ₂₂ Y | W33 | 0.20 | 2.85 | 30.24 | 10.61 | 0.6 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₂₃ Y | W17 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₂₄ Y | W21 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₂₅ Y | W25 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₂₆ Y | W26 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₂₇ Y | W22 | 0.15 | 2.00 | 30.24 | 15.12 | 0.6 | 2/7 | No Aplica |
| M- ₂₈ Y | W2 | 0.15 | 4.00 | 30.24 | 7.56 | 0.6 | 1/7 | No Aplica |
| M- ₂₉ Y | W8 | 0.15 | 2.85 | 30.24 | 10.61 | 0.6 | 1/5 | No Aplica |
| M- ₃₀ Y | W99 | 0.20 | 3.00 | 30.24 | 10.08 | 1.1 | 3/8 | No Aplica |

Como se detalla en las Tablas 38 y 39 ninguno de los elementos de borde debe aumentarse a 30 cm sin embargo hay varios de estos elementos que se encuentran en el límite de esta condición.

7. Conclusiones

Según la evaluación realizada mediante un análisis estático no lineal esta estructura cumple con el objetivo de desempeño establecido, porque los desplazamientos obtenidos del análisis dinámico modal espectral son menores a los obtenidos por el método estático no lineal, por tanto, la estructura tiene más capacidad al desplazamiento que la estimada inicialmente.

El desplazamiento objetivo que se encuentra graficado con los demás límites de desempeño se encuentra anterior al límite de ocupación inmediata (OI), denominado (S-3) según el ASCE 41-17 lo cual significa que la estructura para el sismo de diseño se mantiene con las mismas condiciones de capacidad y resistencia. No se presenta pérdidas de vidas humanas y la estructura funciona con normalidad.

Se evidenció un aumento significativo de la demanda a cortante en algunos muros del sistema estructural según el análisis estático no lineal. Para inhibir por cortante de los muros se revisó de acuerdo al ACI318-19 reforzando de acuerdo a lo requerido.

Referencias Bibliográficas

ACI318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI318-19).

Aguiar Falconi, R. (2010). Fallas Frecuentes Durante Los Terremotos.

Alcocer, S. (2011). Comportamiento a Cortante de Muros de Concreto para Vivienda. revista de Ingeniería Sísmica No. 85.

Alcocer, S. M. (1995). Comportamiento y Diseño de Estructuras de Concreto Reforzado, Muros estructurales. México DF, México : Cenapred - Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Alcocer, S. M. (2006). Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado. Mexico: Centro Nacional de Prevención de Desastres e Instituto de ingeniería.

Arteta, C., Blandón, C., Bonett, R., & Carrillo, J. (2018). Estudio del Comportamiento Sísmico de Edificios de Muros Delgados de Concreto Reforzado.

ASCE/SEI41-13. (2013). Seismic Evaluation and retrofit of Existing Buildings.

ASCE/SEI41-17. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-17). Reston: American Society of Civil Engineers.

Bozzo, M., & Barbat, H. (2004). Diseño Sismo Resistente de Edificaciones, Técnicas Convencionales y Avanzadas. Barcelona: Reverté S.A.

Carrillo, J., & López, Y. (2017). Capacidad y demanda de viviendas con muros de concreto en diferentes zonas de amenaza sísmica en Colombia. Bogotá: VII Congreso de Ingeniería Sísmica.

- Carrilo, J., Echeverri, F., & Aperador, W. (2014). Evaluación de Costos de Construcción de Sistemas Estructurales para Vivienda de Baja Altura y de Interés Social. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada .
- ETABS. (2015). Integrated Analysis, Desig and Drafting of Building Systems Computers abs Strucure, Inc. California, EU.
- Flórez, C. (18 de Mayo de 2016). Cúcuta: Riesgo Sísmico de los Mayores del País. La Opinión.
- Fredrick, A., & Oretaa, A. (2015). Seismic vulnerability asseement of soft irregular buildings using pushover analysis. Procedia Engineering.
- García, L. E. (2015). Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición. Revista Uniandes.
- Gilmorel, A., Espinoza, D., & Garcia, J. (2016). Diseño por desempeño ¿El futuro para el diseño de las estructuras de mamposteria? Sociedad mexicana de ingenieria estructural, 1 - 3.
- Guzmán, T. (15 de junio de 2017). Modelado de Propiedades de Sección Fisurada de Hormigón para Análisis de Edificios. Obtenido de CSI Knowlwdge Base: <https://wiki.csiamerica.com/display/etabs/Modeling+concrete+cracked+section+properties+for+building+analysis>
- Henry, R. (2013). Assessment of Minimum Vertical Reinforcement Limits for RC Wall. Bulletin Of The New Zeland Socoiety for Earthquake Engineering.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 926. (2010).
- Navarro Ugena, C., & Pérez Castellanos, J. L. (2009). Capítulo 1 Introducción a las Estructuras. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- NETWORK, C. -C. (2018). Estudio del Comportamiento Sísmico de Edificios de Muros Delgados de Concreto Reforzado.

- NIST, E. L. (2014). Recommendations for Seismic Design of Reinforced Concrete Wall Buildings Based on Studies of the 2010 Maule, Chile Earthquake.
- PEER/ATC 72-1. (2010). Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings.
- Peña Mondragón, F. (2008). XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Estrategias para el Modelado y el Análisis de Edificios Históricos de Mampostería. Veracruz, México. Obtenido de <http://www.smie>.
- Redacción El Tiempo. (27 de Octubre de 2006). Cúcuta registra auge de edificios altos por caída de norma que lo prohibía.
- Rochel Awad, R. (2012). Análisis y diseño sísmico de edificios. Medellín: Fondo Editorial Universidad Eafit.
- San Bartolomé, A., Quiun, D., & Silva, W. (2011). de Febrero de Comentarios Relativos al Tipo de Falla en Los Muros de Concreto de Edificios Chilenos en el Sismo.
- Sánchez, J., & Arteta, C. (2017). Caracterización Estadística de Edificios de Muros Delgados en Concreto reforzado para Zonas de Amenaza Sísmica Alta . Barranquilla: VIII Congreso de Ingeniería Sísmica.
- Segura, C., & Wallace, J. (2018). Seismic Performance Limitations and detailing of Slender Reinforced Concrete Walls. Technical Paper, ACI STRUCTURAL JOURNAL.
- Segura, C., Arteta, C., Araujo, G., & Wallace, J. (2018). Flexural Compression Capacity of thin reinforced Concrete Structural Walls.
- Segura, C., Wallace, J., Arteta, C., & Moehle, J. (2016). Deformation Capacity of thin Reinforced Concrete Shear Walls.

Sísmica, A. C. (2013). Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras de diferentes de edificaciones. En A. 180. Bogotá D.C. .