



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“REFUERZO SÍSMICO DE UN EDIFICIO MEDIANTE EL
ENCAMISADO DE LOS MARCOS”

T E S I S

Que para obtener el grado de
INGENIERO CIVIL

Presenta

SOCORRO ESTEFANÍA DEL MORAL LÓPEZ

Asesor

DR. MANUEL JARA DÍAZ

MAYO 2022

DEDICATORIA

Con todo cariño dedico este trabajo a mis padres que fueron factor importante para que pudiera concluir este capítulo en mi vida, quienes fueron pilar importante durante toda la carrera ya que con su apoyo constante y amor incondicional logré culminar este proyecto.

A mis abuelos por ser ejemplo en mi vida de honradez, fe, lealtad sapiencia y amor.

A mis hermanas que también son mis mejores amigas que me impulsaron a seguir adelante y quienes son ejemplo a seguir para mí. Quienes han estado para mí en todo momento.

A mí, por no rendirme a pesar de las adversidades que se me presentaron y lograr todo lo que me he propuesto.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero agradecer a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a la facultad de Ingeniería Civil por brindarme todos los conocimientos que hoy poseo, a los profesores que me compartieron sus sapiencias y me formaron para poder llegar hasta donde estoy hoy.

Quiero agradecer a mi asesor el Dr. Manuel Jara Díaz, quien me guio en este largo camino con mucha paciencia y haberme brindando su ayuda constantemente. Agradezco al doctor por haberme instruido en cada etapa de mi tesis y por haber estado presente en cada momento aun cuando pasamos por una pandemia y ser un gran ejemplo de lo que es ser un asesor de tesis. Estoy muy agradecida con él ya que demostró ser una gran persona, además de ser un hombre muy sabio y preparado.

Agradezco a CONACYT por el apoyo que se me dio durante la elaboración de la tesis y dejarme ser parte de esta investigación.

Quiero también agradecer a mi preciado amigo el ingeniero Adrián Ávalos Barrientos, quien me brindó su ayuda en toda la elaboración de la tesis, por su paciencia y tiempo. Para mí fue un placer haber coincidido con él en este camino de mi vida, ya que me demostró lo que es una verdadera amistad y agradezco que me haya brindado su apoyo para no darme por vencida y seguir adelante.

Por último, quiero hacer un agradecimiento muy especial a mis padres el Ing. Gilberto Raúl Del Moral Corona y la Dra. Martha Julieta López Manilla por haberme apoyado en todo el proceso de esta investigación, quienes son mi motivación para seguir adelante en todos mis proyectos y a quienes les debo la vida entera.

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo es analizar el comportamiento de una estructura en su estado original de la ciudad de México ante las sollicitaciones que se presenten tras el sismo de 1985 con ayuda del programa de ETABS y una vez de haber analizado este comportamiento se analizará el comportamiento de la misma con un reforzamiento a base del encamisado de las columnas y trabes. Para el análisis de la respuesta se consideraron diferentes condiciones de modelado con un enfoque lineal; los cuales fueron propuestos por el proyecto Resiliencia Sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), algunas de las características propuestas fueron los cambios del factor de reducción de inercia efectiva de los elementos estructurales (tomadas de distintos reglamentos tales como; ACI318, ACI369, NTC17, etc.), evaluación mediante distintas demandas de aceleración mediante espectros de diseño y espectros de respuesta derivados de la aceleración a la que fue sometida la estructura y cambios en el modelado de los muros de la estructura, entre otros.

Se evaluarán las respuestas de la estructura comparando los distintos modos de vibrar (se analizarán los 3 primeros modos), la demanda sísmica para cada uno de los casos, los desplazamientos que se producen, las distorsiones en los elementos mecánicos en las columnas más críticas y los cortantes sobre las columnas, con el objetivo de tener respuesta del comportamiento sobre la estructura original y la estructura rehabilitada.

RESUMEN

En primer instante es importante conocer los posibles riesgos de una estructura ante un sismo, así como las técnicas de rehabilitación que existen, ya que hay muchas las cuales más adelante se explicarán con más detalle.

Se realizó un modelado de un edificio ubicado en la Ciudad de México dentro de la zona del lago, mediante el software ETABS® donde se analizaron varios modelos con distintas condiciones de análisis proporcionadas por el proyecto Resiliencia Sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), estas condiciones fueron utilizadas para el edificio original y se realizó también un modelado del edificio rehabilitado, ya que se analizó el comportamiento de los dos casos. Para el rehabilitado se utilizó la técnica del encamisado de muros y trabes de la estructura y las condiciones de análisis fueron las mismas que para el modelo original.

Se realizaron varios cálculos con ayuda de Excel, así como otros programas como SeismoSignal.

Se evaluaron los efectos de cada caso de los periodos para los 3 primeros modos de vibrar, así como los desplazamientos, distorsiones, cortantes, etc., modificando los factores de agrietamiento, modelado de muros, espectros de diseño o de respuesta, etc.

Las modificaciones de algunos factores fueron tomadas de distintos reglamentos, según se haya estipulado en el proyecto financiado por el CONACYT, ya que recordemos que la tesis se basó en las propuestas de este proyecto.

PALABRAS CLAVE: Resiliencia, sismos, rehabilitación, estructuras, rigidez.

ABSTRACT

First of all, it is important to know the possible risks of a structure in the event of an earthquake, as well as the rehabilitation techniques that exist, since there are many of them, which will be explained in more detail later on.

A modeling of a building located in Mexico City in the lake area was carried out using ETABS® software, where several models were analyzed with different analysis conditions provided by the Seismic Resilience project of the National Council of Science and Technology (CONACYT), these conditions were used for the original building and a modeling of the rehabilitated building was also carried out, since the behavior of both cases was analyzed. For the rehabilitated building, the technique of encasing the walls and beams of the structure was used and the analysis conditions were the same as for the original model.

Several calculations were performed with the help of Excel, as well as other programs such as SeismoSignal.

The effects of each case of the periods for the first 3 modes of vibration, as well as displacements, distortions, shears, etc., were evaluated by modifying the cracking factors, wall modeling, design or response spectra, etc.

The modifications of some factors were taken from different regulations, as stipulated by CONACYT, since the thesis was based on the proposals of this project.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1. TÉCNICAS DE REFUERZO SÍSMICO | 1 |
| 1.1 REFUERZO SÍSMICO..... | 1 |
| 1.2 MATERIALES UTILIZADOS EN LA REHABILITACIÓN | 2 |
| 1.3 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN | 5 |
| 1.3.1 ENCAMISADO DE CONCRETO | 6 |
| CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO | 7 |
| 2.1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO..... | 8 |
| 2.2 DAÑOS OCASIONADOS POR EL SISMO DE 1985 | 9 |
| 2.3 REFUERZO ADOPTADO DESPUÉS DEL SISMO..... | 11 |
| CAPÍTULO 3. MODELO DEL EDIFICIO ORIGINAL..... | 14 |
| 3.1. MODELO NUMÉRICO DEL EDIFICIO | 14 |
| 3.2 ÁNÁLISIS MODAL..... | 23 |
| 3.2.1 PERIODOS..... | 24 |
| 3.2.2 DESPLAZAMIENTOS..... | 26 |
| 3.2.3 DISTORSIONES..... | 28 |
| 3.3 INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO | 31 |
| 3.4 MODELADO DE MUROS | 35 |
| CAPÍTULO 4. MODELADO DEL EDIFICIO REFORZADO | 36 |
| 4.2 MODELO NUMÉRICO | 38 |
| 4.2.1 PERIODOS..... | 39 |
| 4.2.2 DESPLAZAMIENTOS..... | 41 |
| 4.2.3 DISTORSIONES..... | 44 |
| 4.2.4 CORTANTE..... | 47 |
| 4.2.5 FLEXOCOMPRESIÓN | 48 |
| 4.3 INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO | 50 |
| 4.4 MODELADO DE MUROS | 52 |
| CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DEL EDIFICIO ORIGINAL Y REFORZADO PARA DISTINTAS DEMANDAS SÍSMICAS | 53 |
| 5.1 ESPECTRO DE DISEÑO ORIGINAL | 54 |
| 5.1.1 PERIODOS..... | 55 |
| 5.1.2 DESPLAZAMIENTOS..... | 56 |
| 5.1.3 DISTORSIONES..... | 57 |

| | |
|---|----|
| 5.1.4 CORTANTE..... | 58 |
| 5.2 ESPECTRO DE DISEÑO DEL 2017 | 59 |
| 5.2.1 PERIODO..... | 60 |
| 5.2.2 DESPLAZAMIENTOS..... | 61 |
| 5.2.3 DISTORSIONES..... | 62 |
| 5.2.4 CORTANTE..... | 64 |
| 5.3 ESPECTRO DE RESPUESTA DE LA SCT 1985 | 64 |
| 5.3.1 PERIODO..... | 65 |
| 5.3.2 DESPLAZAMIENTOS..... | 67 |
| 5.3.3 DISTORSIONES..... | 68 |
| 5.3.4 CORTANTE..... | 70 |
| 5.4 ESPECTRO DE RESPUESTA DE LAS ESTACIONES CERCANAS AL EDIFICIO EN 2017..... | 70 |
| 5.4.1 PERIODO..... | 71 |
| 5.4.2 DESPLAZAMIENTOS..... | 72 |
| 5.4.3 DISTORSIONES..... | 73 |
| 5.4.4 CORTANTE..... | 75 |
| CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 76 |
| 6.1 EDIFICIO ORIGINAL..... | 76 |
| 6.2 EDIFICIO REHABILITADO | 82 |
| CONCLUSIÓN..... | 87 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 89 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 1. TOMADA DEL REPORTE DE AGUILAR, ET AL, 1996. ENCAMISADO DE CONCRETO..5 | |
| ILUSTRACIÓN 2. ENCAMISADO DE COLUMNA.....7 | 7 |
| ILUSTRACIÓN 3. ENCAMISADO DE VIGA.....7 | 7 |
| ILUSTRACIÓN 4. FRENTE DEL "EDIFICIO A" DE LA CDMX.7 | 7 |
| ILUSTRACIÓN 5. PLANTA TIPO DEL EDIFICIO (AGUILAR, ET AL., 1996).8 | 8 |
| ILUSTRACIÓN 6. ELEVACIÓN DEL EDIFICIO (AGUILAR, ET AL., 1996).....9 | 9 |
| ILUSTRACIÓN 7. VARILLAS DE REFUERZO EXPUESTAS, LAS CUALES SUFRIERON PANDEO Y FRACTURAS.....11 | 11 |
| ILUSTRACIÓN 8. EFECTO DE COLUMNA CORTA.....11 | 11 |
| ILUSTRACIÓN 9. ENCAMISADO DE COLUMNA.....12 | 12 |
| ILUSTRACIÓN 10. REFUERZO CONTINUO DE COLUMNAS.....12 | 12 |
| ILUSTRACIÓN 11ENCAMISADO DE VIGA.....13 | 13 |
| ILUSTRACIÓN 12. VIGA REFORZADA.....13 | 13 |
| ILUSTRACIÓN 13. ESPECTRO OBTENIDO DE SASID.....17 | 17 |
| ILUSTRACIÓN 14. TIPOS DE SUELO DE LA CDMX (SISMOS MÉXICO, 2020)19 | 19 |
| ILUSTRACIÓN 15. ESTACIONES CERCANAS AL EDIFICIO EN ESTUDIO.....19 | 19 |
| ILUSTRACIÓN 16. COMPARACIÓN DE ESPECTROS, CON RESPECTO A LAS ESTACIONES CERCANAS AL EDIFICIO.....19 | 19 |
| ILUSTRACIÓN 17. GEOMETRÍA DEL MURO DIAFRAGMA (NTC, 2017)21 | 21 |
| ILUSTRACIÓN 18. SIMULACIÓN DE MURO DIAFRAGMA EN MOVIMIENTO.....22 | 22 |
| ILUSTRACIÓN 19. MURO DIAFRAGMA CON 3 DIAGONALES.....22 | 22 |
| ILUSTRACIÓN 20. ESQUELETO DEL EDIFICIO CON DIAGONALES.....24 | 24 |
| ILUSTRACIÓN 21. ESQUELETO DEL EDIFICIO CON MUROS DE PLACA.....24 | 24 |
| ILUSTRACIÓN 23 SEGUNDO PERIODO DE VIBRAR PARA TODOS LOS CASOS.....25 | 25 |
| ILUSTRACIÓN 24. TERCER PERIODO DE VIBRAR PARA TODOS LOS CASOS.....25 | 25 |
| ILUSTRACIÓN 22 PRIMER PERIODO DE VIBRAR PARA TODOS LOS CASOS.....25 | 25 |
| ILUSTRACIÓN 25. DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL EN AMBAS DIRECCIONES.....27 | 27 |
| ILUSTRACIÓN 26 DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL EN AMBAS DIRECCIONES.....27 | 27 |
| ILUSTRACIÓN 27. DISTORSIONES LONGITUDINALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL.....29 | 29 |
| ILUSTRACIÓN 28. DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL.....30 | 30 |
| ILUSTRACIÓN 29. DISTORSIONES LONGITUDINALES CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL.....30 | 30 |
| ILUSTRACIÓN 30 DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL.....31 | 31 |
| ILUSTRACIÓN 31. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS.....32 | 32 |

| | |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 32. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS..... | 32 |
| ILUSTRACIÓN 33. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL PARA ALGUNOS CASOS. | 34 |
| ILUSTRACIÓN 34. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA ALGUNOS CASOS..... | 34 |
| ILUSTRACIÓN 35. COMPARACIÓN DE PERIODOS EN SUS PRIMEROS 3 MODOS DE VIBRAR..... | 36 |
| ILUSTRACIÓN 36. ENCAMISADO DE COLUMNAS EL EDIFICIO EN ESTUDIO. | 38 |
| ILUSTRACIÓN 37. PRIMER MODO DE VIBRAR DEL EDIFICIO REHABILITADO. | 39 |
| ILUSTRACIÓN 38. TERCER MODO DE VIBRAR DEL EDIFICIO REHABILITADO..... | 40 |
| ILUSTRACIÓN 39. SEGUNDO MODO DE VIBRAR DEL EDIFICIO REHABILITADO. | 40 |
| ILUSTRACIÓN 40. MODELO CON DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS..... | 42 |
| ILUSTRACIÓN 41. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL DEL EDIFICIO REHABILITADO. | 42 |
| ILUSTRACIÓN 42. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL DEL EDIFICIO REHABILITADO. | 43 |
| ILUSTRACIÓN 43. DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS. | 44 |
| ILUSTRACIÓN 44. DISTORSIONES LONGITUDINALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS. | 45 |
| ILUSTRACIÓN 45 . DISTORSIONES LONGITUDINALES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS. | 45 |
| ILUSTRACIÓN 46 DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS. | 46 |
| ILUSTRACIÓN 47. CORTANTE DE LOS MODELOS REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL..... | 47 |
| ILUSTRACIÓN 48. MOMENTOS EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL Y CARGA AXIAL. | 48 |
| ILUSTRACIÓN 49. MOMENTOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL Y CARGA AXIAL..... | 49 |
| ILUSTRACIÓN 50. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS PARA EL EDIFICIO REHABILITADO. | 50 |
| ILUSTRACIÓN 51 DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS PARA EL EDIFICIO REHABILITADO. | 50 |
| ILUSTRACIÓN 52. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA ALGUNOS CASOS..... | 51 |

| | |
|--|----|
| ILUSTRACIÓN 53. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL PARA ALGUNOS CASOS. | 52 |
| ILUSTRACIÓN 54. COMPARACIÓN DE PERIODOS EN SUS PRIMEROS 3 MODOS DE VIBRAR DE LA ESTRUCTURA REHABILITADA. | 53 |
| ILUSTRACIÓN 55. ESPECTROS UTILIZADOS PARA CADA MODELO. | 54 |
| ILUSTRACIÓN 56. PERIODOS PARA MODELOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO ORIGINAL..... | 55 |
| ILUSTRACIÓN 57. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL..... | 56 |
| ILUSTRACIÓN 58. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES. | 57 |
| ILUSTRACIÓN 59. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 1, 2 Y 3 REHABILITADOS. | 57 |
| ILUSTRACIÓN 60. CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES Y REHABILITADOS. | 58 |
| ILUSTRACIÓN 61. PERIODOS PARA MODELOS DEL 10 AL 15 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE SASID. | 60 |
| ILUSTRACIÓN 62. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS DEL 10 AL 15 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL..... | 61 |
| ILUSTRACIÓN 63. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 10 AL 15 ORIGINALES..... | 62 |
| ILUSTRACIÓN 64. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 10 AL 15 REHABILITADOS..... | 63 |
| ILUSTRACIÓN 65. CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS 10 AL 15 ORIGINALES Y REHABILITADOS..... | 64 |
| ILUSTRACIÓN 66. PERIODOS PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LA SCT 1985 | 65 |
| ILUSTRACIÓN 67. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON ESPECTRO DE LA SCT 1985..... | 67 |
| ILUSTRACIÓN 68. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES, CON ESPECTRO DE LA SCT 1985. | 68 |
| ILUSTRACIÓN 69. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 REHABILITADOS, CON ESPECTRO DE LA SCT 1985. | 69 |
| ILUSTRACIÓN 70 CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LA SCT 1985..... | 70 |

| | |
|--|----|
| ILUSTRACIÓN 71. PERIODOS PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LAS ESTACIONES CERCANAS | 71 |
| ILUSTRACIÓN 72. . DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON ESPECTRO DE LAS ESTACIONES CERCANAS..... | 72 |
| ILUSTRACIÓN 73. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES, CON ESPECTRO DE ESTACIONES CERCANAS..... | 73 |
| ILUSTRACIÓN 74 DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 REHABILITADOS CON ESPECTRO DE ESTACIONES CERCANAS..... | 74 |
| ILUSTRACIÓN 75 CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LAS ESTACIONES CERCANAS. | 75 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE CASOS 1, 2 Y 3. | 15 |
| TABLA 2. CONSIDERACIONES PARA CASOS DEL 10 AL 15 | 16 |
| TABLA 3. CONSIDERACIONES PARA CASOS DEL 20 AL 25. | 18 |
| TABLA 4. CONSIDERACIONES PARA LOS CASOS DEL 20 AL 25 CON ESPECTRO DE SCT | 20 |
| TABLA 5 ESPECIFICACIONES DEL FACTOR DE REDUCCIÓN EN CADA MODELO | 33 |
| TABLA 6 MODELADO DE MUROS PARA CADA CASO. | 35 |
| TABLA 7. RESULTADOS DE LOS PERIODOS ORIGINALES Y REHABILITADOS CON DIFERENTES ESPECTROS, CON ESPECIFICACIONES IGUALES | 66 |



CAPÍTULO 1. TÉCNICAS DE REFUERZO SÍSMICO DE EDIFICIOS

1.1 REFUERZO SÍSMICO

El reforzamiento sísmico es una acción para incrementar la resistencia de una estructura, de modo que impida que esta llegue al colapso o bien prevenir la caída de algún elemento no estructural, como muros, pretilas, etc.

Para definir si un edificio requiere una intervención estructural, es preciso seguir un procedimiento para identificar aquella vulnerabilidad o daño por sismo. El procedimiento es el siguiente:

- Evaluación sísmica de la estructura
- Determinación de la capacidad sísmica requerida
- **Selección de las técnicas o métodos de rehabilitación**
- Diseño de los detalles de conexiones
- Reevaluación de la estructura rehabilitada

Existe hoy en día gran variedad de técnicas de refuerzo sísmico para optimizar la respuesta estructural de los edificios. Las técnicas de refuerzo consisten en modificaciones en las estructuras con la finalidad de que estas se adapten mejor a la actividad sísmica que se pueda presentar o a cualquier otra acción que pueda ocasionar daños a la estructura.

Una de las finalidades de utilizar estas técnicas de refuerzo es precisamente la preservación de estructuras, ya que esto no es algo sencillo. Para poder aplicar alguna técnica de refuerzo, se deben considerar algunos aspectos importantes antes de realizar cualquier modificación, como lo es; la seguridad física de las personas, el análisis del uso actual y futuro que tendrá el edificio para con base en ello realizar las modificaciones; también dependerá de la manera en que se quiera mejorar el comportamiento sísmico.



“El comportamiento sísmico de una estructura se puede mejorar si se reduce la demanda sísmica, si se aumenta su capacidad o mediante una combinación de ambas acciones.

La demanda sísmica se puede reducir con las siguientes alternativas:

- I. Modificando el periodo natural para obtener una menor amplificación de la aceleración del suelo
- II. Mejorando las características del suelo o aislando la estructura del movimiento del suelo
- III. Cambiando el uso de la estructura

La capacidad sísmica se puede aumentar: reforzando los elementos estructurales existentes y/o añadiendo elementos estructurales nuevos.” (Mondragón, 2012)

La técnica de refuerzo varía en cada edificación, ya que es muy bien sabido que cada construcción es un problema único, es por eso que no existen reglas generales para la elección de las técnicas de refuerzo a emplear. Es por eso que se debe analizar todas las características del edificio a tratar, ya que se trata de seleccionar la técnica óptima, tomando en cuenta el costo/beneficio.

El objetivo de las técnicas es corregir las posibles deficiencias estructurales y aumentar la resistencia de las estructuras ante cualquier sismo, asimismo se busca aumentar la rigidez o la ductilidad de los elementos críticos, con el fin de asegurar el bienestar de las personas. Debido a lo anterior se han analizado y rehabilitado edificios en la ciudad de México, sin previo daño. No obstante, la mayoría de los edificios que se han rehabilitado, fueron los que sufrieron daños tras el sismo de 1985.

1.2 MATERIALES UTILIZADOS EN LA REHABILITACIÓN

El tema que se abordará en este capítulo se basará principalmente en el reporte “Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in Mexico City” (Jorge Aguilar, et al., 1996).

Los materiales que fueron utilizados en la Ciudad de México en los edificios, los cuales fueron rehabilitados tras sufrir daños por el sismo de 1985, debían cumplir con ciertas características que se mencionan a continuación:

1. Ser duradero y proteger el refuerzo.



2. Ser dimensionalmente estable para evitar la pérdida de contacto entre los materiales antiguos y los nuevos debido a la contracción.
3. Proporcionar una buena unión entre los materiales nuevos y los antiguos, incluida la unión entre los elementos de acero y hormigón.
4. Ser capaz de desarrollar una resistencia adecuada a edades tempranas, especialmente si hay que restaurar rápidamente la capacidad de un elemento dañado.

Para que un material sea el adecuado para satisfacer las funciones estructurales de un edificio deben estar presentes las propiedades mecánicas y el costo. Además, el material que compone la estructura debe tener propiedades de permeabilidad y durabilidad ante la intemperie.

Cuando se habla de una estructura que requiere una rehabilitación, se debe tomar en cuenta que las características del material adicional deben ser similares a las del material existente, ya que con esto se evitarán sobreesfuerzos al material original. En algunos casos es posible que se necesite colocar concreto nuevo para rehabilitar algún elemento que haya quedado expuesto al colapso o haya sufrido daño, de ser así la resistencia a la compresión del concreto adicional debía ser al menos igual al concreto original. Sin embargo, se consideró una diferencia de resistencia para evitar el fallo y el aplastamiento de los materiales con menor resistencia. Los materiales principalmente utilizados, fueron:

1. Resina.

La resina es un material muy duradero, que además es impermeable y resistente al desgaste. Esta se utilizó para reparar grietas, también para aquellas partes donde se obtuvo un daño mínimo de concreto, la resina se utilizó para sustituirlas. Gracias a las propiedades físicas de la resina que, al endurecerse, obtiene grandes resistencias y características de adherencia al material, se permitió ser utilizado para anclar nuevos elementos de acero y concreto.

A pesar de las buenas características que tiene la resina, existen algunas propiedades que deben tomarse en cuenta para evitar perjudicar su comportamiento, como su pérdida de integridad a temperaturas superiores a los 100 °C y como lo ya mencionado anteriormente, la resina tiende a endurecerse, pero el tiempo en que pasa de estado líquido al estado sólido, es realmente mínimo, es por ello que es importante que al trabajarlo se haga de manera rápida, de modo que esta característica de la resina no afecte con el comportamiento más tarde.



2. Concreto.

El concreto es una mezcla de agregados y cemento que al solidificarse se convierte en un material resistente para la construcción. El concreto puede ser hecho en sitio o bien puede ser lanzado y se han empleado para reparaciones diferentes.

El concreto hecho en sitio, fue utilizado para remplazar secciones que sufrieron daños con el fin de aumentar la capacidad del elemento o bien, añadir nuevos elementos con mayor resistencia a fuerzas laterales. Se consideró hacer un colado monolítico entre los materiales nuevos y los originales con el fin de que el comportamiento fuera beneficioso en la estructura rehabilitada.

El concreto lanzado fue utilizado tanto para reparar como para reforzar muros de concreto y mampostería, además de revestir elementos. El concreto lanzado tiene ventajas como la buena adherencia al concreto existente y tiene una gran resistencia.

3. Morteros y lechadas

El mortero es la mezcla de un aglomerante, agua y arena. Esta mezcla tiene una consistencia pastosa, con la finalidad de ser moldeable y tener buena adherencia a los materiales. Por otro lado, la lechada es una mezcla de cemento, yeso, agua, etc.; la consistencia de esta mezcla es ligera.

Ambas mezclas fueron utilizadas para reparar grietas de hasta 0.5 mm. en los elementos de concreto o mampostería

4. Elementos de acero y conectores

Estos elementos fueron utilizados para sustituir las barras dañadas en los elementos de concreto. Cuando se unen elementos de acero siempre debe asegurarse la continuidad para evitar un posible fallo, por lo que es importante que, al tener la unión de dos elementos, se realice un empalme o se utilicen conectores mecánicos o soldaduras.



1.3 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN

Existen muchas técnicas de rehabilitación las cuales tienen la misma finalidad que es preservar la estructura de futuros daños modificando los elementos originales por nuevos elementos o bien, restaurados. Cuando una estructura se encuentra dañada, no solo se busca con estas técnicas que sea reparada, sino que sea más resistente y que sea capaz de soportar las futuras solicitaciones. Algunas de las técnicas que se utilizan son:

- ❖ Anclajes
- ❖ **Encamisados de concreto**
- ❖ Inyección
- ❖ Refuerzo externo
- ❖ Encamisados de acero
- ❖ Arrostramiento de acero, entre otros.

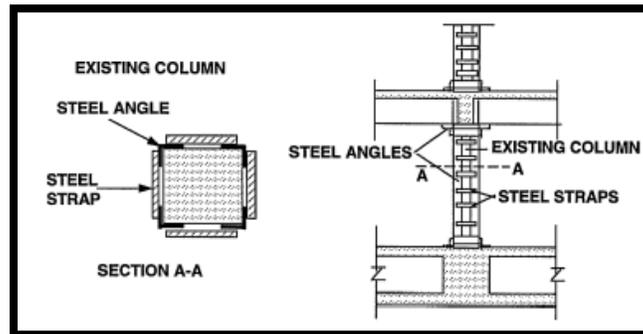


ILUSTRACIÓN 1. TOMADA DEL REPORTE DE AGUILAR, ET AL, 1996. ENCAMISADO DE ACERO

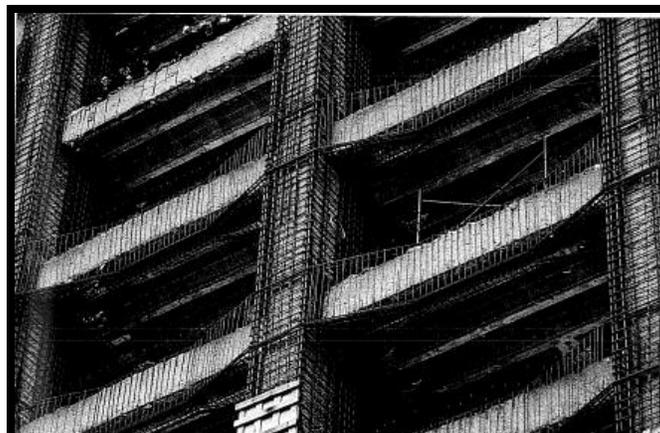


ILUSTRACIÓN 2. TOMADA DEL REPORTE DE AGUILAR, ET AL, 1996. ENCAMISADO DE CONCRETO



En las figuras 1 y 2 se muestran las técnicas de encamisado con elementos metálicos y encamisado con concreto reforzado, respectivamente. En esta tesis la técnica que se utilizó fue el encamisado de concreto, es por ello que se analizará y explicará a profundidad únicamente esta técnica.

1.3.1 ENCAMISADO DE CONCRETO

“Es la forma de reforzar un elemento que no cuenta con capacidad resistente suficiente, envolviendo el elemento estructural actual con una sección adicional de concreto convenientemente armado (aumentando la sección del elemento), reforzándolo frente a compresión, flexión, cortante y torsión garantizando el trabajo simultáneo entre diferentes elementos. Lo anterior con objeto de cumplir lo establecido en la normatividad actual, es decir, cumplir con una resistencia, factores de seguridad, calidad de los materiales, funcionalidad y vida útil de las estructuras. Este refuerzo ofrece eficacia y garantía a diferencia de otros métodos de reforzamiento, puesto que ofrece menos costo y mayor rapidez de ejecución. Adicionalmente se evita un impacto negativo en la obra, en lo que, a costos, tiempo de entrega, contaminación ambiental por generación de basuras, escombros y mala imagen de la empresa constructora se refiere. Siendo el concreto uno de los materiales más usados para fines estructurales por su buen comportamiento en servicio, adaptabilidad a las formas constructivas y económicas, es equivalente usarlo para aprovechar estas mismas características una vez se presentan situaciones que afectan su buen servicio, las cuales serán nombradas más adelante.” (Vargas, s.f.)

Cuando un elemento presenta altos niveles de esfuerzos de compresión, una excesiva deformación lateral o se requiera mejorar la continuidad de los elementos, se puede construir una estructura de concreto armado que recubra el elemento original, Esta técnica tiene varias ventajas como la compatibilidad entre el material original y el de refuerzo, buena resistencia al fuego debido a su baja conductividad térmica, entre otros.

Las siguientes ilustraciones del edificio que se analizará en esta tesis fueron tomadas del reporte “Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in Mexico City” (Aguilar, et al., 1996)

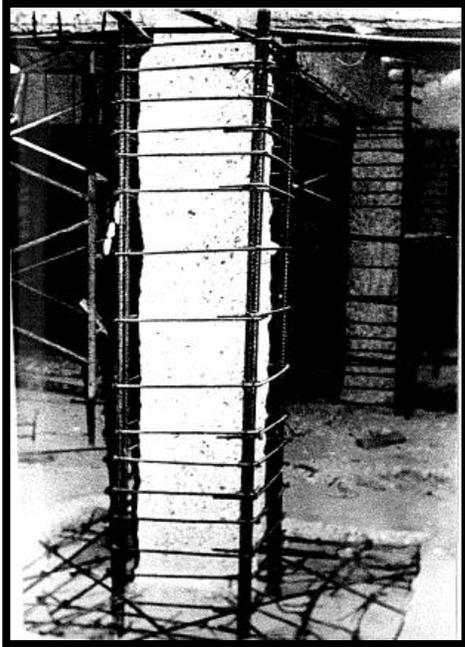


ILUSTRACIÓN 3. ENCAMISADO DE COLUMNA

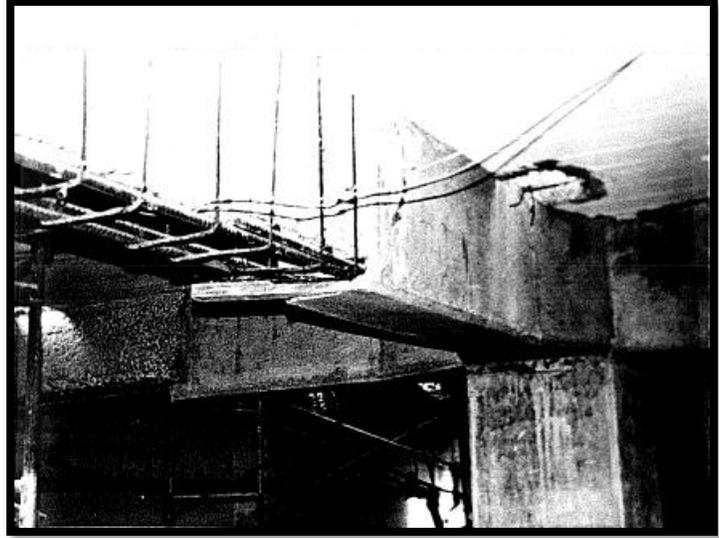


ILUSTRACIÓN 4. ENCAMISADO DE VIGA

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Este capítulo al igual que el anterior, se basará principalmente en el reporte “Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in Mexico City” (Aguilar, et al., 1996).

Tras el sismo de 1985 en la ciudad de México, se analizaron 12 edificios y más tarde fueron rehabilitados y en la actualidad todos están en uso. En esta tesis se hablará de un edificio en particular, ubicado en la zona del lecho del lago de la Ciudad de México y en el reporte obtiene el nombre de “Edificio A”.



ILUSTRACIÓN 5. FRENTE DEL "EDIFICIO A" DE LA CDMX.



2.1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

El edificio fue diseñado y construido en el año de 1959, es utilizado como almacén y cuenta con un área de 1996 metros cuadrados, con un planta baja y 4 pisos. Es una estructura prácticamente regular de 41.9 m. por lado, con la fachada principal en diagonal, como se observa en la figura 5. La figura 6 se muestra la planta del edificio.

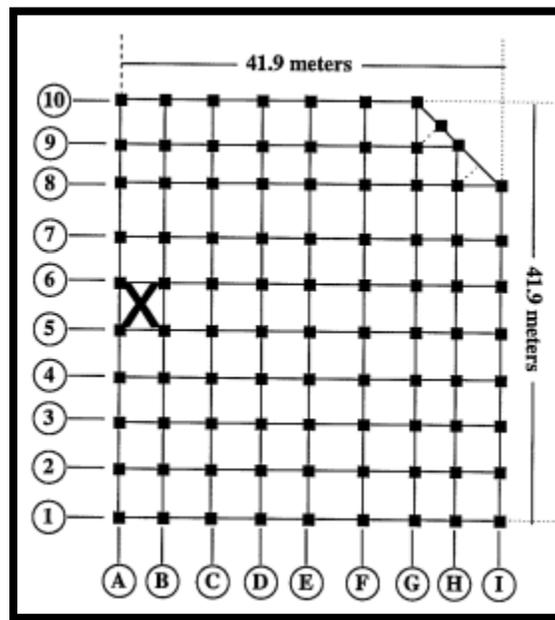


ILUSTRACIÓN 6. PLANTA TIPO DEL EDIFICIO (AGUILAR, ET AL., 1996).

La estructura se analizó tanto en su estructura original como en su estructura rehabilitada, lo cual se describe en los siguientes capítulos. La estructura original consiste en marcos de concreto armado en direcciones ortogonales y el sistema de piso es una losa que trabaja en dos direcciones. Una losa bidireccional a diferencia de una losa unidireccional, logra que las cargas verticales se distribuyan de manera más uniforme entre las vigas y luego estas hacia columnas y por último hacia las zapatas.

El tipo de base que se utilizó fue una cimentación compensada. “Se entiende por cimentaciones compensadas a aquellas en las que se busca reducir el incremento neto de carga aplicado al subsuelo mediante excavaciones del terreno y uso de un cajón desplantado a cierta profundidad. Según que el incremento neto de carga aplicado al suelo en la base del cajón resulte



positivo, nulo o negativo, la cimentación se denomina parcialmente compensada, compensada o sobre-compensada, respectivamente.” (NTC, 2017). Se utilizaron muros de ladrillo sin refuerzo alrededor de las escaleras y en los muros perimetrales; lo muros se extendían en toda la altura del entrepiso en los marcos perimetrales (líneas de columna A e I, como se muestra en la ilustración 6). Cabe mencionar que previo al sismo de 1985, no se hicieron modificaciones a la estructura.

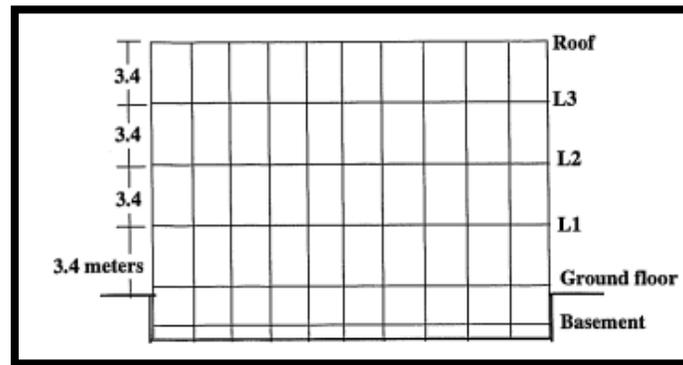


ILUSTRACIÓN 7. ELEVACIÓN DEL EDIFICIO (AGUILAR, ET AL., 1996)

Las propiedades del material de la estructura original fueron las siguientes:

Resistencia del concreto $f'c = 200 \text{ Kg} / \text{cm}^2$

Acero de refuerzo $fy = 4200 \text{ Kg} / \text{cm}^2$

2.2 DAÑOS OCACIONADOS POR EL SISMO DE 1985

Después de ocurrido el sismo de 1985, el edificio sufrió daños significativos en su estructura. De acuerdo con Aguilar, et al. (1996), el daño se concentró en el segundo piso del edificio y los elementos que más daños sufrieron fueron las columnas con grietas de más de 1 mm. lo que originó que hubiera desprendimiento y algunas varillas de refuerzo quedaron expuestas, las cuales se pandearon y fracturaron. Este evento, no produjo daños a edificios adyacentes.

Tampoco se observaron fallas en los cimientos, pero la estructura estaba inclinada a 20 cm de la plomada. Sin embargo, no hubo pruebas suficientes para concluir que este problema ocurrió debido al sismo.

Las columnas más dañadas en el segundo piso se ubicaron en 2B y 6B (Ver la ilustración 6). Estas columnas perdieron el recubrimiento y las varillas de refuerzo quedaron expuestas (Como



se muestra en la ilustración 8). Algunas otras columnas en el mismo piso tenían grietas mayores de 1 mm. El daño en las columnas del segundo piso se debió principalmente a la restricción proporcionada por los muros de mampostería que produjeron un efecto de columna corta (Ilustración 9). “El Efecto de Columna Corta consiste en una restricción parcial del desplazamiento lateral del cuerpo de una columna, que obliga a concentrar toda la demanda de deformaciones y tensiones en su porción libre. El caso más común se presenta cuando hay paredes que no abarcan toda la altura, sino que dejan un espacio vacío para la ventana” como es el caso del edificio que se analizó y se puede observar en la ilustración 1. Este efecto es una de las causas más comunes de daños catastróficos en estructuras dañadas por sismos. El efecto de columna corta origina consecuencias como la modificación local de la distribución de tensiones y deformaciones del miembro estructural afectado, así como también:

1. Aumento del cortante.

La tensión por cortante se entiende como la suma de momentos (M) en sus extremos, dividida entre la altura libre (L), por lo que se puede expresar con la siguiente expresión: $V = \Sigma M/L$.

2. Disminución de la ductilidad.

La ductilidad es la capacidad de deformación inelástica de forma alterada y estable que posee un sistema estructural.

3. Aumento de la rigidez.

La rigidez es la propiedad que relaciona las deformaciones con las tensiones que se generan en un material o un sistema estructural

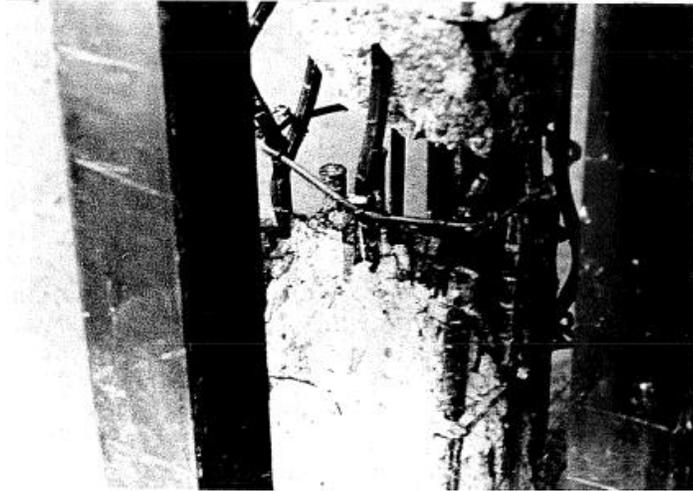


ILUSTRACIÓN 8. VARILLAS DE REFUERZO EXPUESTAS, LAS CUALES SUFRIERON PANDEO Y FRACTURAS.

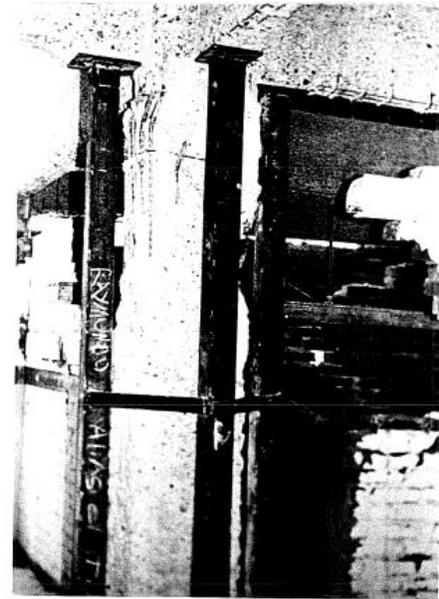


ILUSTRACIÓN 9. EFECTO DE COLUMNA CORTA.

El empalme excesivo de las varillas en el mismo lugar resultó en una falla en esa sección (Ilustración 8), y la falta de confinamiento por refuerzo transversal contribuyó también a la falla. No se encontraron daños en la viga o losa.

La fachada frontal sufrió algunos daños menores, pero los otros muros de la fachada (eje 10) se agrietaron ampliamente. Algunos muros perimetrales en el tercer y cuarto piso estaban agrietados y en algunos casos fallaron localmente; los muros alrededor de las escaleras también sufrieron grietas. La conexión entre la rampa de concreto de la escalera y las losas del piso experimentó grietas extensas.

2.3 REFUERZO ADOPTADO DESPUÉS DEL SISMO

Debido al comportamiento de la estructura durante el sismo de 1985, se decidió incrementar la resistencia y se aumentó la rigidez del edificio al revestir completamente todas las vigas y columnas con concreto armado. El diseño de la técnica de refuerzo se basó en el Código del Distrito Federal de 1976 y en las modificaciones estipuladas en las Normas de emergencia. Se asumió un comportamiento monolítico entre las secciones de concreto originales y nuevas. La estructura se idealizó como marcos planos que corren en ambas direcciones ortogonales. Los efectos de torsión



estática se consideraron siguiendo las recomendaciones que se incluyen en el Código de 1976. Las columnas y vigas se diseñaron para alcanzar la máxima resistencia teniendo en cuenta la más crítica de las dos siguientes condiciones de carga:

1. Carga estática (Carga muerta + Carga viva) multiplicada por un factor de carga de 1.4.
2. Carga estática y terremoto multiplicado por un factor de carga 1.1.

Además, el factor de reducción de capacidad utilizado para ambas condiciones de carga se modificó a 0,5 en las columnas, según lo estipulado en las Normas de emergencia

Las propiedades del material utilizadas para la reparación y el refuerzo de la estructura tenían las siguientes propiedades:

Resistencia del concreto $f'c$ 250 Kg / cm²

Acero de refuerzo f_y = 4200 Kg / cm²

Los detalles del refuerzo longitudinal y transversal adicional en la camisa se muestran en las ilustraciones 10 y 11. El espesor mínimo de la camisa de concreto fue de 12 cm. El nuevo refuerzo longitudinal se hizo continuo a través de agujeros perforados en la losa (ilustración 10). La superficie de concreto de la columna original se le proporcionó cierta rugosidad con herramientas manuales, para una mayor adherencia entre el concreto original y el nuevo. (Ilustración 9).

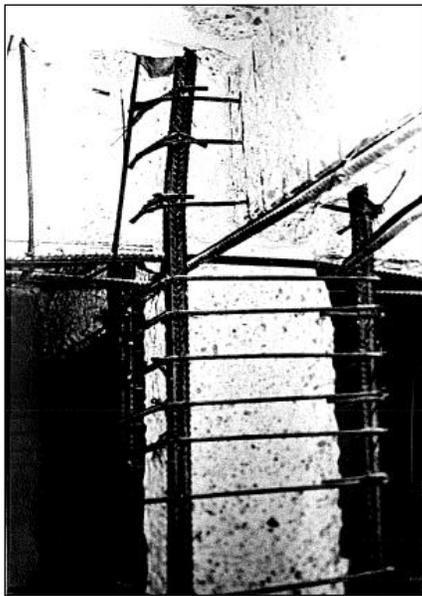


ILUSTRACIÓN 1. REFUERZO CONTINUO DE COLUMNAS.



ILUSTRACIÓN 11. ENCAMISADO DE COLUMNA.



Las columnas dañadas se repararon sustituyendo el acero de refuerzo que se había fracturado con nuevas varillas de acero soldadas al acero original en una sección donde no había sufrido ningún daño. Debido a que la estructura tenía muchas columnas que no estaban dañadas, los pisos permanecieron en posición.

En las vigas, se colocó refuerzo longitudinal y transversal adicional como se muestra en la siguiente ilustración.

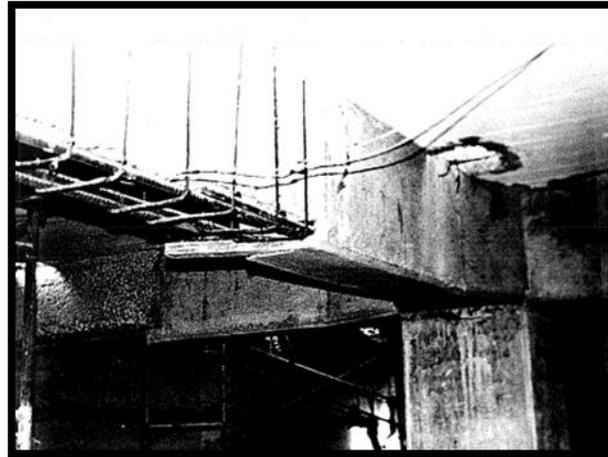


ILUSTRACIÓN 12. ENCAMISADO DE VIGA.

El refuerzo longitudinal se hizo continuo entre los claros, pasando las barras alrededor de las columnas como se puede ver en la siguiente ilustración.

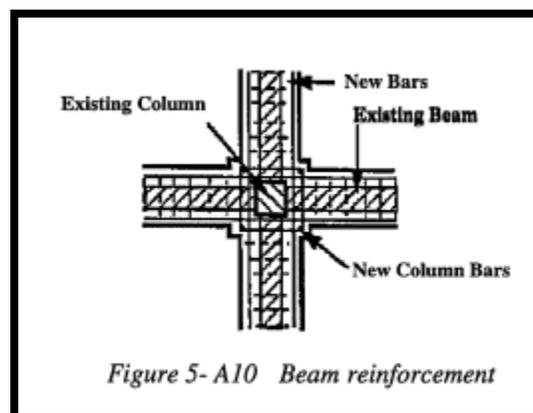


ILUSTRACIÓN 13. VIGA REFORZADA.



La preparación de la superficie del concreto existente se realizó de la misma manera que para las columnas para asegurar una adecuada transferencia de los esfuerzos entre el concreto viejo y nuevo (Ilustración 12).

Se utilizaron las siguientes medidas para modificar los elementos no estructurales:

1. Los muros de mampostería en los ejes 1 y A se separaron de la estructura para reducir la rigidez y excentricidad (torsión) que crearon.
2. Todas las particiones de la pared de ladrillo que habían sido dañadas fueron reemplazadas con especial cuidado para separarlos adecuadamente de la estructura y evitar desarrollar restricciones que puedan ocurrir cuando la estructura se deforma lateralmente.
3. Se reemplazaron las rampas de la escalera.

Las ilustraciones del capítulo 2 fueron extraídas del reporte de Aguilar, et al. 1996.

CAPÍTULO 3. MODELO DEL EDIFICIO ORIGINAL

3.1. MODELO NUMÉRICO DEL EDIFICIO

“Un modelo numérico es una representación teórica de un fenómeno natural, típicamente expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento.” (Perú, s.f.).

En este capítulo se explicará detalladamente del proceso que se realizó en el modelo del edificio en estudio, es importante destacar que dicho proceso fue propuesto por el proyecto Resiliencia Sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). En primer instante se analizó el edificio original; es decir, sin rehabilitaciones/modificaciones en su estructura, con el propósito de observar el comportamiento de la estructura debido a que se utilizaron variables de distintos reglamentos y normas.

Se realizaron 24 modelos para la estructura original con ayuda del software ETABS, cada caso con distintas especificaciones de cargas, espectros, materiales, etc.



Es importante destacar la importancia que tiene un espectro de diseño, ya que nos ayuda a estimar la intensidad sísmica con la que se debe diseñar una estructura. El objetivo de los espectros de diseño es conocer cómo se transfiere la energía sísmica del suelo a las edificaciones y así poder intervenir en futuros sismos. En esta tesis se utilizaron 4 espectros de diseño para distintos casos; en la tabla 1 se especifican las condiciones adoptadas en los casos 1 a 3.

Casos con espectro de diseño de las NTC 1966

| <i>Caso</i> | <i>Estructura</i> | <i>Carga Viva</i> | <i>Carga sísmica</i> | <i>Muros de carga</i> | <i>Agrietamiento</i> | <i>E</i> | <i>F'c</i> |
|-------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------|------------|
| 1 | Original | NTC-1966 | Espectro NTC-1966 | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 2 | Original | NTC-1966 | Espectro NTC-1966 | Placas | NTC-17 | NTC-17 | Proyecto |
| 3 | Original | NTC-1966 | Espectro NTC-1966 | Placas | NTC-17 | NTC-17 | Proyecto |

TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE CASOS 1, 2 Y 3.

Para los 3 primeros casos, se utilizó el espectro de diseño de las normas técnicas complementarias de 1966, el cual consiste en un valor constante de 0.06 g, independientemente del periodo estructural. Sin embargo, para cada caso en los que se utilizó el mismo espectro, se consideraron especificaciones de materiales diferentes, así como el factor de agrietamiento. A continuación, se explicarán las especificaciones de cada caso:

Carga viva. Se entiende por carga viva a todas aquellas fuerzas externas que se producen por el uso de una edificación, como lo es el viento, las personas, los sismos, entre otros. Para los casos 1, 2 y 3, se consideró una carga viva de entrepiso de 110 kg/m² y 40 kg/m² para azotea (para fuerzas sísmicas), debido a que dichos casos se basaron en el Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal del año 1966 (NTC 1966).

Carga muerta. Por otra parte, la carga muerta considera los pesos de todos los elementos constructivos, es por ello que se realizó un análisis de cargas con los respectivos pesos volumétricos de entrepiso y de azotea, tomando como base las NTC de 1966 y del 2017. También se consideró una sobrecarga, la cual es añadida como factor de seguridad, esta carga adicional fue añadida a todos los modelos de esta tesis y se asignó el mismo valor para todas de 55 kg/m².



Materiales. Se utilizó un $f'c$ de 250 kg/cm², ya que esa era una especificación de proyecto y un módulo de elasticidad igual a $10,000 \sqrt{f'c}$ de acuerdo con las NTC 1976.

Factor de agrietamiento. El factor de agrietamiento es un factor de reducción en los elementos para analizar el comportamiento de la estructura, ya que el agrietamiento siempre estará presente, por lo que tomar únicamente casos con la inercia de las secciones bruta o totalmente rígida sería un error, es por eso que en el caso 1 se consideró la inercia bruta, pero el caso 2 y 3 se consideró el factor de agrietamiento que proponen las NTC 17 de 0.7 para columnas y 0.5 para vigas y muros.

En la tabla 2 se muestran los casos 10 a 15, en los cuales se utilizó el espectro de diseño de las NTC 2017.

Casos con espectro de diseño de las NTC 2017

| <i>Caso</i> | <i>Estructura</i> | <i>Carga Viva</i> | <i>Carga sísmica</i> | <i>Muros de carga</i> | <i>Agrietamiento</i> | <i>E</i> | <i>F'c</i> |
|-------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|--------------|
| 10 | Original | NTC-2017 | Espectro NTC-2017 | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 11 | Original | NTC-2017 | Espectro NTC-2017 | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 12 | Original | NTC-2017 | Espectro NTC-2017 | Placas | NTC-17 | NTC-17 | Proyecto |
| 13 | Original | NTC-2017 | Espectro NTC-2017 | Placas | NTC-17 | Guía técnica | Guía técnica |
| 14 | Original | NTC-2017 | Espectro NTC-2017 | Placas | ACI318 | Guía técnica | Guía técnica |
| 15 | Original | NTC-2017 | Espectro NTC-2017 | Placas | ACI369 | Guía técnica | Guía técnica |

TABLA 2. CONSIDERACIONES PARA CASOS DEL 10 AL 15

Para estos casos, se utilizó el espectro de diseño de las normas técnicas complementarias de 2017, el cual fue obtenido del SASID proporcionando algunas características del edificio en estudio, como:

Factor de irregularidad. De acuerdo con las NTC para diseño por sismo, en el apartado 5. Condiciones de regularidad, el edificio en estudio cumple con los 13 puntos establecidos, por lo que fue considerada como una estructura regular.



Factor de hiperestaticidad. De acuerdo con las NTC para diseño por sismo, el factor de hiperestaticidad fue considerado de 1.0 ya que se trata de un sistema estructural de concreto que cuenta con más de 3 crujeías resistentes a sismo en las dos direcciones de análisis. Esto viene descrito en el capítulo 3.5 Factor de sobre-resistencia.

Clasificación de la estructura. Para fines de diseño sísmico, según las NTC, la estructura se agrupó en la sección Grupo B, ya que se trata de una edificación común que es utilizado como almacén. Así mismo, está en el subgrupo B1, ya que tiene una altura superior a los 15 m. siendo un solo cuerpo.

Teniendo estas características definidas, se obtuvo el espectro, el cual se muestra en la siguiente figura, con una Q de diseño igual a 4 (línea verde).

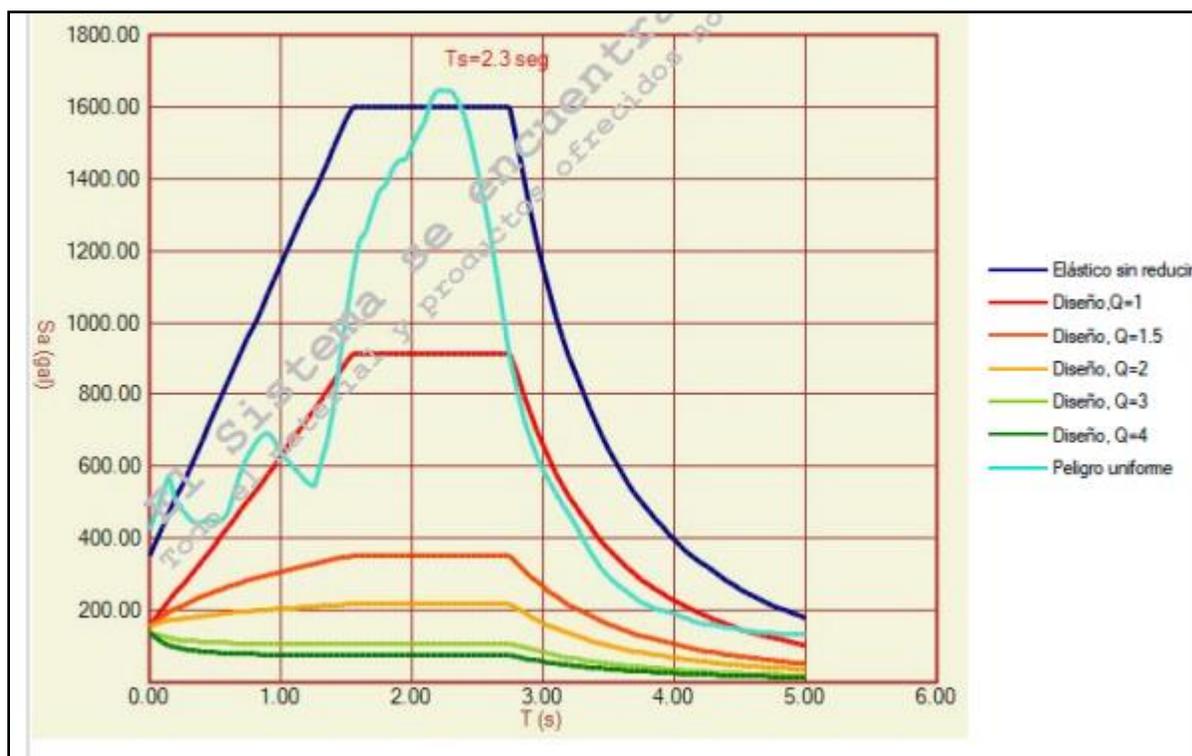


ILUSTRACIÓN 2. ESPECTRO OBTENIDO DE SASID

Carga viva. Para los casos 10 al 25, se consideró una carga viva de entrepiso de 180 kg/m² y 70 kg/m² para azotea de acuerdo con las NTC 17.

Carga muerta. La carga muerta se utilizó la misma que en los casos 1 a 3.



Materiales. Para los casos 10, 11 y 12 se utilizó un $f'c$ de 250 kg/cm², ya que esa era una especificación de proyecto y un módulo de elasticidad igual a $1,000 \sqrt{f'c}$ de acuerdo con las NTC 1976y para los casos 13,14 y 15, se utilizaron valores de $f'c$ y del módulo de elasticidad recomendados por la guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México del año 2019 (Guía técnica 2019).

Factor de agrietamiento. Para los casos 10 y 11, se utilizó la sección bruta; es decir, no hubo factor de reducción en las inercias. Para los casos 12 y 13 se consideró un factor de agrietamiento por las NTC 17 de 0.7 para columnas y 0.5 para vigas y muros. Y por último para los casos 14 y 15 se utilizaron valores del código 318 del American Concrete Institute (ACI 318) y del código 369 del American Concrete Institute (ACI 369), respectivamente. Cabe mencionar que el ACI 369 es un código enfocado a los proyectos de rehabilitación, razón por la cual fue incluido en el estudio. La tabla 3 muestra los casos 20 a 25 que fueron analizados con el espectro derivado de un registro de aceleración de 2017.

Casos con espectro de respuesta de las estaciones cercanas al edificio

| <i>Caso</i> | <i>Estructura</i> | <i>Carga Viva</i> | <i>Carga sísmica</i> | <i>Muros de carga</i> | <i>Agrietamiento</i> | <i>E</i> | <i>F'c</i> |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|--------------|
| 20 | Original | NTC-2017 | Espectro registro 19S | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 21 | Original | NTC-2017 | Espectro registro 19S | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 22 | Original | NTC-2017 | Espectro registro 19S | Placas | NTC-17 | NTC-17 | Proyecto |
| 23 | Original | NTC-2017 | Espectro registro 19S | Placas | NTC-17 | Guía técnica | Guía técnica |
| 24 | Original | NTC-2017 | Espectro registro 19S | Placas | ACI318 | Guía técnica | Guía técnica |
| 25 | Original | NTC-2017 | Espectro registro 19S | Placas | ACI369 | Guía técnica | Guía técnica |

TABLA 3. CONSIDERACIONES PARA CASOS DEL 20 AL 25.

Para obtener este espectro, primero se localizó el edificio en estudio, así como las estaciones más cercanas a este y se comparó con una imagen con los tipos de suelo de la CDMX, para que de esta manera, las estaciones que se tomaran tuvieran el mismo tipo de suelo y así poder elegir la mejor.



El tipo de suelo en el que se encontraba el edificio es en la Zona IIIc (de color rojo), por lo que se tomaron las estaciones 1, 2 y 6. Con ayuda del software SeismoSignal, se hicieron correcciones a las estaciones y se obtuvieron gráficas, las cuales fueron extraídas a una hoja de Excel y con algunos cálculos y comparaciones de espectros con respecto al espectro de peligro uniforme del SASID, se tomó el más similar y fue el que se utilizó para estos casos.

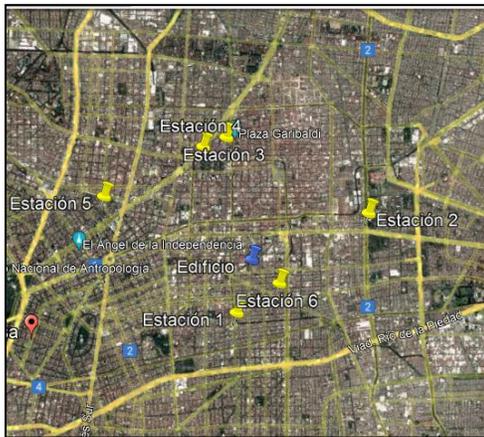


ILUSTRACIÓN 15. ESTACIONES CERCANAS AL EDIFICIO EN ESTUDIO.

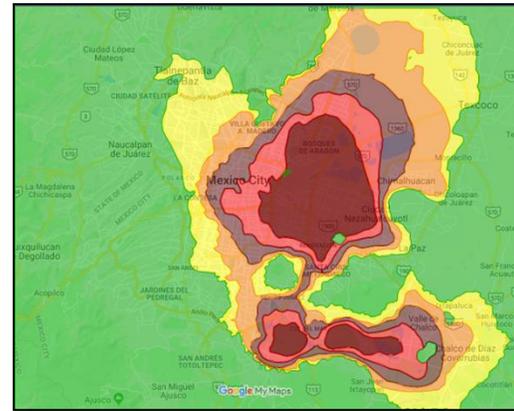


ILUSTRACIÓN 16. TIPOS DE SUELO DE LA CDMX (SISMOS MÉXICO, 2020)

La estación que finalmente se eligió fue la 6, ya que era la más similar al espectro que se obtuvo de SASID.

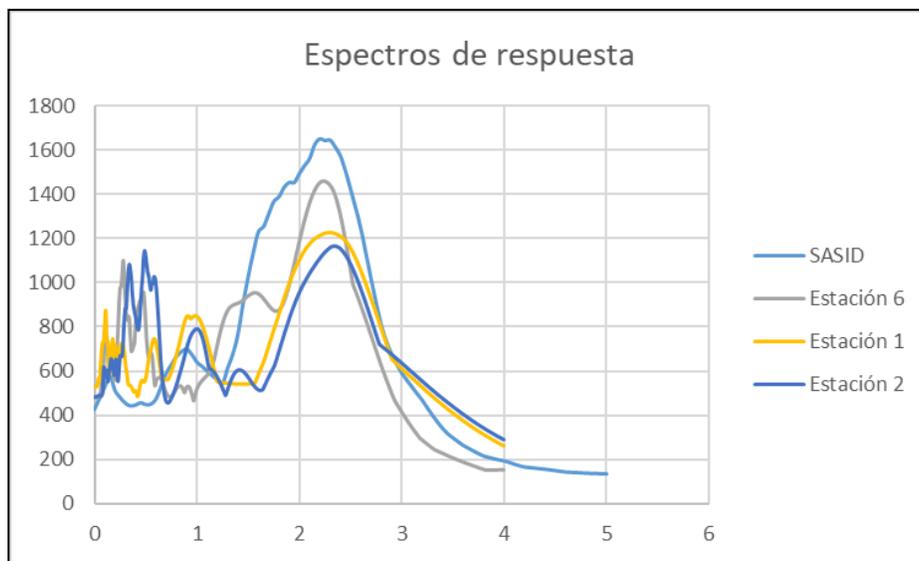


ILUSTRACIÓN 18. COMPARACIÓN DE ESPECTROS, CON RESPECTO A LAS ESTACIONES CERCANAS AL EDIFICIO.



Finalmente, se utilizó el espectro del registro de la SCT de 1985, pues es más cercano a nuestro edificio y se ubica en el mismo tipo de suelo. La tabla 4 presenta los casos 20 a 25 en los que se aplicó el espectro de 1985.

Casos con espectro de respuesta de la SCT de 1985

| <i>Caso</i> | <i>Estructura</i> | <i>Carga Viva</i> | <i>Carga sísmica</i> | <i>Muros de carga</i> | <i>Agrietamiento</i> | <i>E</i> | <i>F'c</i> |
|-------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------|--------------|
| 20 | Original | NTC-2017 | Espectro SCT 1985 | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 21 | Original | NTC-2017 | Espectro SCT 1985 | Placas | Bruta | NTC-17 | Proyecto |
| 22 | Original | NTC-2017 | Espectro SCT 1985 | Placas | NTC-17 | NTC-17 | Proyecto |
| 23 | Original | NTC-2017 | Espectro SCT 1985 | Placas | NTC-17 | Guía técnica | Guía técnica |
| 24 | Original | NTC-2017 | Espectro SCT 1985 | Placas | ACI318 | Guía técnica | Guía técnica |
| 25 | Original | NTC-2017 | Espectro SCT 1985 | Placas | ACI369 | Guía técnica | Guía técnica |

TABLA 4. CONSIDERACIONES PARA LOS CASOS DEL 20 AL 25 CON ESPECTRO DE SCT.

Para este espectro se utilizó también el software SeismoSignal y se realizó el mismo procedimiento para corregir los valores y obtener la gráfica de aceleración/periodo y se realizan los cálculos en Excel para obtener el espectro.

Para las demás consideraciones como cargas, materiales, factor de agrietamiento, etc., se utilizaron los mismos de los casos del 10 al 15, ya que también se realizaron los modelos del 20 al 25 como en el caso anterior y únicamente cambió el espectro.

Cabe mencionar que, para los casos del 11 en adelante a excepción del 20, se modelaron con diagonales equivalentes, utilizando elementos tipo link. El método de cálculo fue tomado de las NTC 17 y se explicará de manera breve a continuación:



Las diagonales equivalentes funcionan como muros diafragma, sustituyendo los muros tipo placa. El caso 11, se dividió en 11a y 11b, con una y tres diagonales respectivamente. Para el cálculo de una sola diagonal, se tomaron en cuenta las siguientes expresiones:

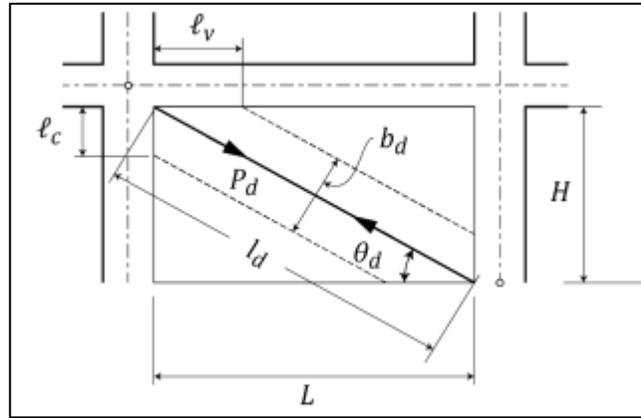


ILUSTRACIÓN 6. GEOMETRÍA DEL MURO DIAFRAGMA (NTC, 2017)

$$b_d = \frac{1}{2} \sqrt{l_c^2 + l_v^2} \leq \frac{l_d}{4}$$

ECUACIÓN 1 ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL ESPESOR DEL MURO DIAFRAGMA

$$l_d = (H^2 + L^2)^{\frac{1}{2}}$$

ECUACIÓN 2. ECUACIÓN PARA DETERMINAR LA LONGITUD DE LA DIAGONAL.

$$l_v = \pi \left(\frac{4E_f l_v L}{E_m t \sin 2\theta_d} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ECUACIÓN 3. ECUACIÓN PARA DETERMINAR LA DISTANCIA ENTRE EL MURO DIAFRAGMA Y LA VIGA.

$$l_c = \frac{\pi}{2} \left(\frac{4E_f l_c H}{E_m t \sin 2\theta_d} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ECUACIÓN 4. ECUACIÓN PARA DETERMINAR LA DISTANCIA ENTRE EL MURO DIAFRAGMA Y LA COLUMNA.

$$\theta_d = \tan^{-1} H/L$$

ECUACIÓN 1. ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL ÁNGULO QUE SE FORMA DE LA DIAGONAL CON RESPECTO A LA HORIZONTAL.



Con las ecuaciones anteriores que fueron obtenidas de las NTC 17, se calculó la geometría del muro diafragma y con ayuda de Excel se realizaron los cálculos correspondientes. Para las tres diagonales lo que se hizo fue considerar las siguientes ilustraciones, donde el ancho b_d , se dividió entre dos para determinar la longitud entre las 3 diagonales y realizar los debidos cálculos en Excel.

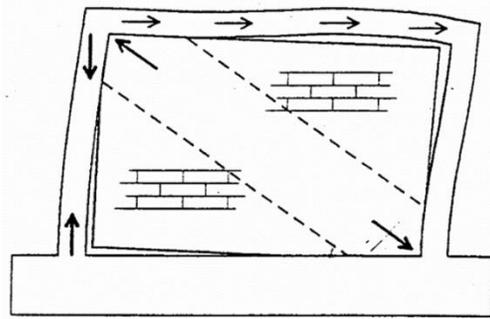


ILUSTRACIÓN 19. SIMULACIÓN DE MURO DIAFRAGMA EN MOVIMIENTO.

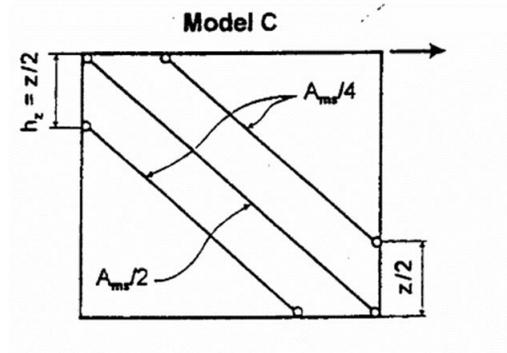


ILUSTRACIÓN 20. MURO DIAFRAGMA CON 3 DIAGONALES

Estas ilustraciones fueron tomadas de las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal del 2017.



3.2 ANÁLISIS MODAL

“El fin del análisis sísmico tradicional consiste en que la estructura sea capaz de resistir sin problemas un sismo de baja intensidad. Para uno de mediana intensidad se acepta que la edificación sufra daños, pero que éstos sean reparables. Y por último para un sismo de gran intensidad sólo se exige que la estructura no colapse, logrando preservar la vida de los ocupantes.

El análisis modal espectral es un método para estimar los desplazamientos y fuerzas en elementos de un sistema estructural considerando el comportamiento dinámico y usando un espectro como medida de intensidad sísmica. Su base metodológica radica en que la vibración del suelo es transmitida a toda la estructura a través de sus elementos y como consecuencia de ella, las principales masas se mueven o desplazan en forma relativa respecto al suelo. De una forma análoga la estructura se puede asimilar a una serie de péndulos invertidos sometidos a una vibración en la base, cada uno de los cuales representa el comportamiento de una de los modos de vibrar de la estructura. Por lo tanto, todos los péndulos no responden del mismo modo ante una vibración en la base. De hecho, cada estructura posee una frecuencia propia o natural, determinada fundamentalmente por su rigidez y altura, a la que vibrará frente a cualquier excitación a la que se someta.” (Cuevas, 2016)

El objetivo de realizar un análisis modal es analizar el comportamiento de cada uno de los casos de estudio, y así observar el cambio en las diferentes aceleraciones por la variación de propiedades que se realizaron en esta tesis y comparar las aceleraciones de mayor valor con cada uno de los espectros.

Para realizar el análisis modal se utilizó el software ETABS y con los datos ya mencionados en el apartado anterior, se creó el esqueleto de la estructura y se dieron de alta todas las especificaciones como: cargas, espectros, dimensiones y características de los elementos mecánicos. Las figuras siguientes muestran el modelo numérico del edificio original, utilizando placas y diagonales equivalentes para representar a los muros de mampostería.

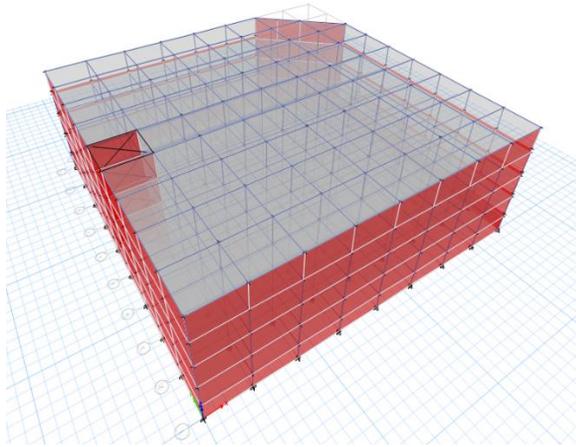


ILUSTRACIÓN 21. ESQUELETO DEL EDIFICIO CON MUROS DE PLACA.

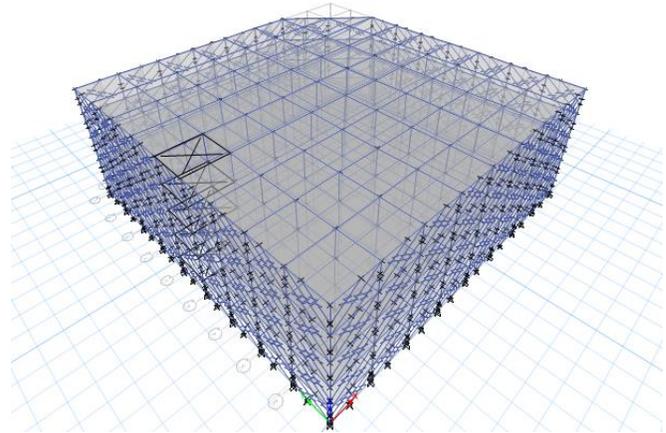


ILUSTRACIÓN 22. ESQUELETO DEL EDIFICIO CON DIAGONALES.

Una vez teniendo los modelos con todas las especificaciones correspondientes a cada caso según estaba estipulado en el proyecto Resiliencia Sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), se verifica que los modelos no tengan advertencias (“warnings”) y seguido de esto el modelo se corre para poder analizar los resultados.

3.2.1 PERIODOS

Los periodos sirven para determinar cuál será su respuesta ante los movimientos sísmicos que puedan llegar a presentarse.

Estos son propiedades dinámicas del edificio los cuales pueden variar dependiendo de la irregularidad de la estructura, así como por los materiales o la masa, y son independientes de la acción sísmica a la que se someta al edificio.

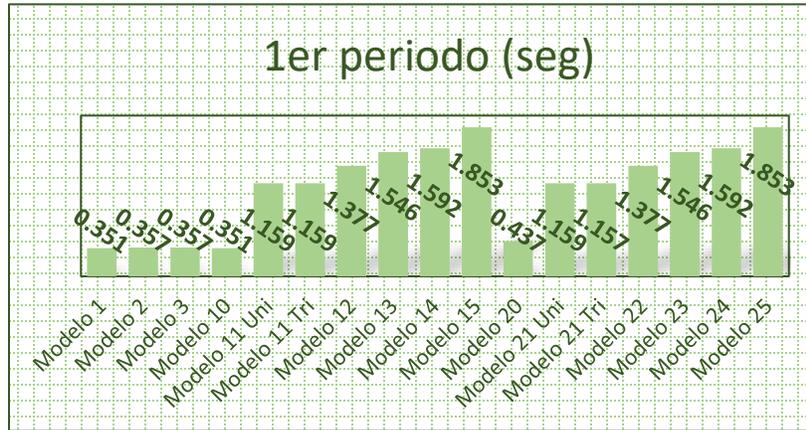


ILUSTRACIÓN 23. PRIMER PERIODO DE VIBRAR PARA TODOS LOS CASOS.

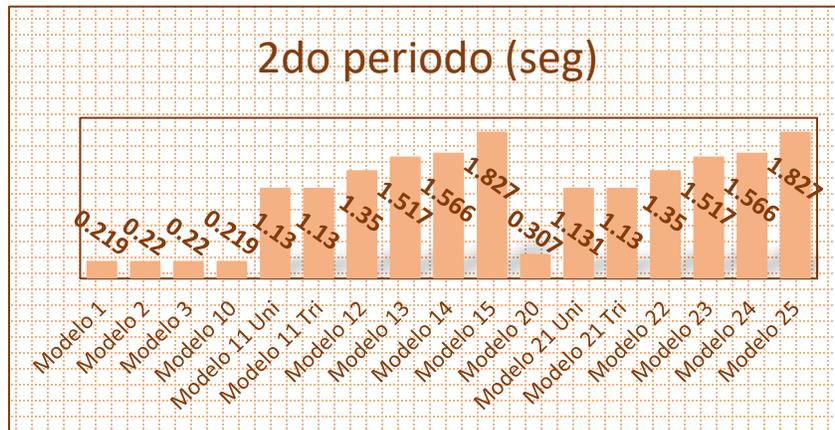


ILUSTRACIÓN 24. SEGUNDO PERIODO DE VIBRAR PARA TODOS LOS CASOS.

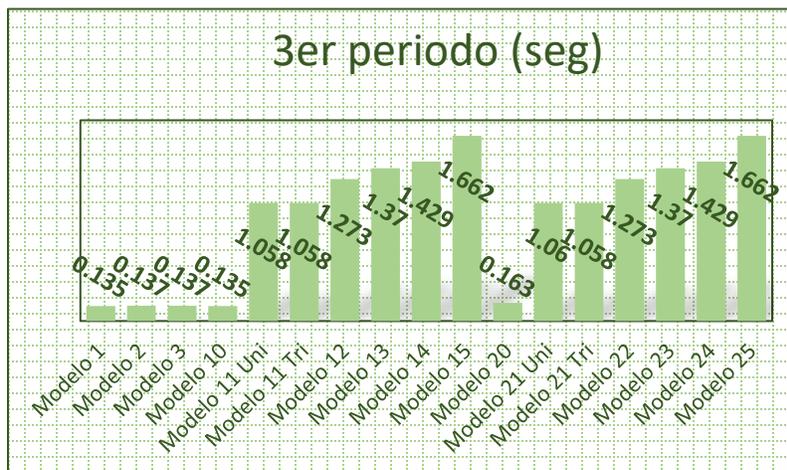


ILUSTRACIÓN 25. TERCER PERIODO DE VIBRAR PARA TODOS LOS CASOS.



Como se puede observar, los periodos fueron aumentando del caso 1 al 15, debido a que conforme iban avanzando los casos, las condiciones iban cambiando también. Como ya se había mencionado en el apartado anterior, algunos casos se consideraban ciertos agrietamientos; es decir, factores de reducción a las inercias y estos factores dependieron del reglamento en el que se basó cada caso. Al hacer estas reducciones la estructura se vuelve más flexible debido a que lo que se quiere lograr con estos factores es modelar al edificio en su condición más cercana a la real. Los primeros casos del 1 a 10 fueron los más pequeños y del 11 al 15 se elevaron los periodos donde se observa el mayor cambio debido a que estos casos fueron modelados con las diagonales equivalentes y se vuelven más flexibles.

Dentro del análisis se observaron distintos modos de vibrar. Un modo de vibrar es la manera en la que se moverá un sistema mecánico y estos tienen muchos modos de vibración. La vibración de una estructura en general es una combinación de todos los modos de vibrar, pero se debe tomar en cuenta que no tienen la misma importancia todos los modos. En esta tesis se analizaron los primeros 3 modos de vibrar que son los que tienen mayor participación en la respuesta.

En este sentido se puede analizar en las ilustraciones 22, 23 y 24, los 3 primeros modos de vibrar y se observa que los periodos disminuyen en el modo 3, lo que significa que para los casos del 1 al 10 los modelos tenían más flexibilidad en dirección transversal y menor en torsión y para los casos 11 al 15 los modelos tenían más flexibilidad en dirección longitudinal y menor en torsión.

Es importante mencionar que para los casos del 20 al 25 los resultados de los periodos son iguales a los de los casos 10 al 15 porque las especificaciones para estos fueron las mismas, lo que cambió fue el espectro de diseño.

3.2.2 DESPLAZAMIENTOS

Los desplazamientos surgen cuando la estructura se ve sometida bajo la acción de fuerzas y los elementos mecánicos sufren deformaciones o distorsiones, por lo que la estructura tiende a desplazarse y tomar una nueva posición. En las siguientes ilustraciones se mostrarán los desplazamientos en dirección longitudinal y en dirección transversal con ambas combinaciones en cada dirección.

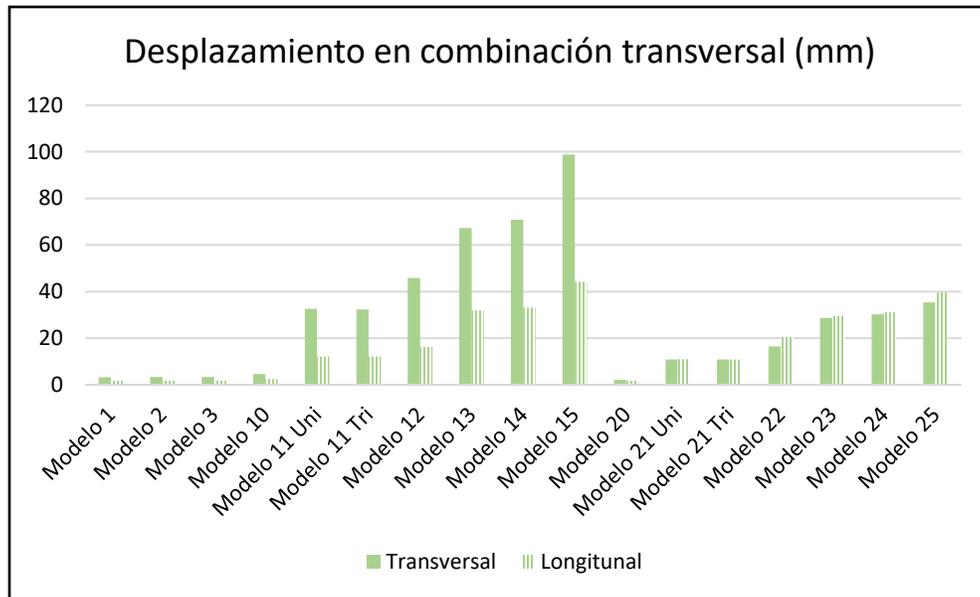


ILUSTRACIÓN 26. DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL EN AMBAS DIRECCIONES.

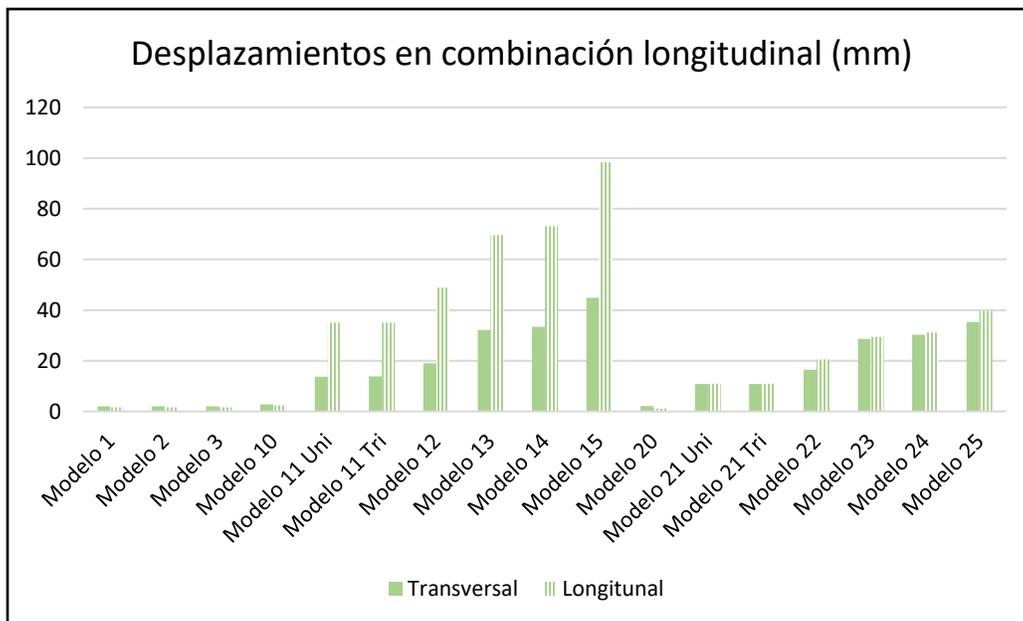


ILUSTRACIÓN 27. DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL EN AMBAS DIRECCIONES.



Se pueden apreciar 3 variaciones o secciones de desplazamientos en las ilustraciones 25 y 26 debido a que en cada segmento se utilizó un espectro diferente; es decir, para los casos 1,2,3 y 10 se utilizó el espectro de las NTC 1966, para los casos 11 al 15 se utilizó el espectro de diseño de las NTC 2017 y para los casos del 20 al 25 se utilizó el espectro de respuesta de las estaciones cercanas al edificio.

Los primeros modelos del 1 al 10 tienen desplazamientos menores, pero se puede apreciar que la dirección transversal es ligeramente mayor que la dirección longitudinal tanto en la combinación longitudinal como en la transversal.

En los casos del 11 al 15 se encuentran los desplazamientos más grandes, por lo que se puede concluir que son los casos más flexibles de todos, debido a las consideraciones tomadas y al espectro utilizado. Sin embargo, se aprecia que en la combinación transversal la dirección transversal tiene más desplazamiento que la dirección longitudinal y por otra parte en la combinación longitudinal, la dirección longitudinal tiene más desplazamiento que la dirección transversal.

Por último, los casos del 20 al 25, los desplazamientos disminuyeron, lo cual se atribuye al cambio de espectro, ya que como ya se había mencionado las consideraciones como materiales, inercias, etc., fueron exactamente las mismas que las de los casos del 10 al 15

Cabe mencionar que los desplazamientos fueron medidos en mm.

3.2.3 DISTORSIONES

“La distorsión de entrepiso se define como la diferencia entre los desplazamientos laterales de los pisos consecutivos que lo delimitan dividida entre la diferencia de elevaciones correspondiente. Para efectos de revisión, los desplazamientos laterales se obtienen del análisis realizado con las fuerzas sísmicas de diseño, y deberá considerarse la mayor distorsión de las que se calculan para cada elemento o subsistema vertical contenido en el entrepiso (marcos, muros y cualquier otro elemento vertical). Se deberán revisar los desplazamientos laterales para las dos condiciones de diseño.” (NTC, 2017)



Su objetivo es al igual que los desplazamientos, conocer el comportamiento de la estructura y su nivel de daño. En las siguientes 4 ilustraciones se mostrarán los resultados de cada caso tomando en cuenta ambas direcciones con combinaciones longitudinales y transversales.

Es importante mencionar que para todas las ilustraciones de las distorsiones se agregaron límites que son normados de la NTC 17, los cuales son los siguientes:

- Para condición de servicio es igual a 0.002
- Para límite de colapso es igual a 0.005

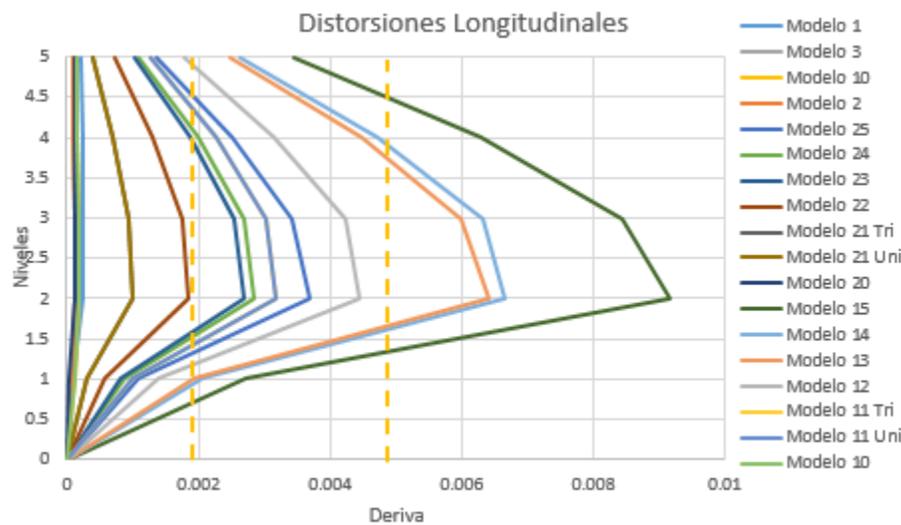


ILUSTRACIÓN 28. DISTORSIONES LONGITUDINALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL.

Como se puede observar en la ilustración 27 los modelos 1, 2, 3, 10, 11Tri, 20, 21Uni, 21Tri y 22 están antes de los límites de servicio y de colapso. Los modelos 11Uni, 12, 23, 24 y 25 salen del límite de servicio, pero están por debajo del límite de colapso. Los modelos 13, 14 y 15 superan el límite de colapso. Se entiende que los modelos con espectro del SASID fueron los de mayores distorsiones debido a los factores de reducciones en sus inercias, los espectros con los que fueron modelados, entre otros factores que hicieron que estos modelos se volvieran más flexibles.

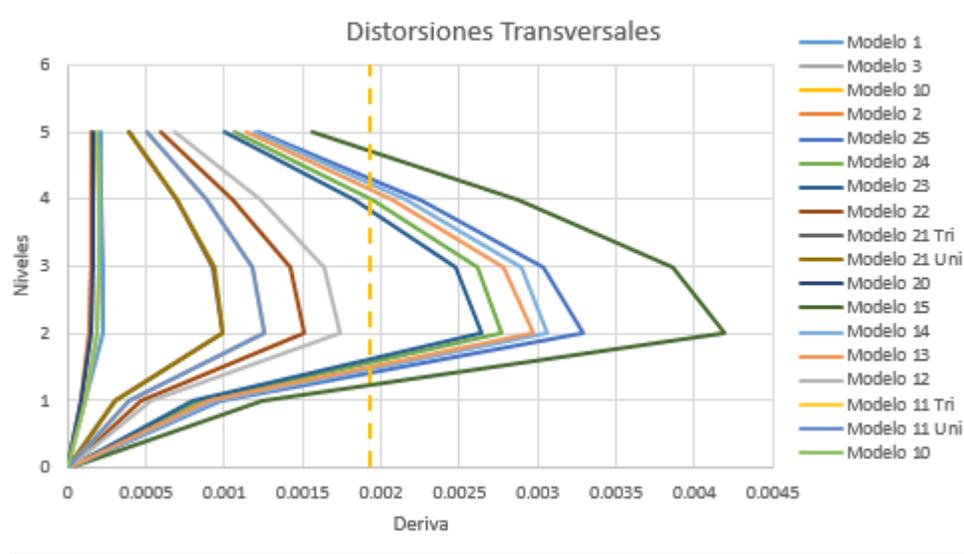


ILUSTRACIÓN 29. DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL.

Para las distorsiones transversales con combinación longitudinal (ilustración 29), fueron menores las distorsiones ya que ninguno de los modelos sobrepasó el límite de colapso. Sin embargo, los casos 13, 14, 15, 23, 24 y 25 sobrepasaron el límite de servicio. Todos los modelos faltantes quedaron por debajo de los límites.

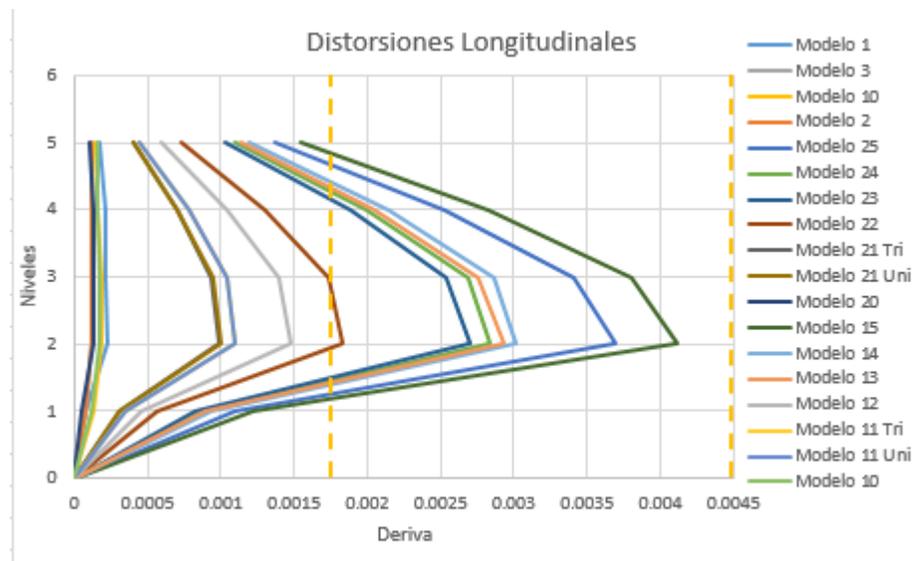


ILUSTRACIÓN 30. DISTORSIONES LONGITUDINALES CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL.



En la ilustración 30 se puede observar una ligera similitud con la ilustración 29, ya que los modelos 13, 14, 15, 22, 23, 24 y 25 quedaron por debajo del límite de colapso, pero sobrepasaron el límite de servicio y todos los demás modelos quedaron por debajo los límites.

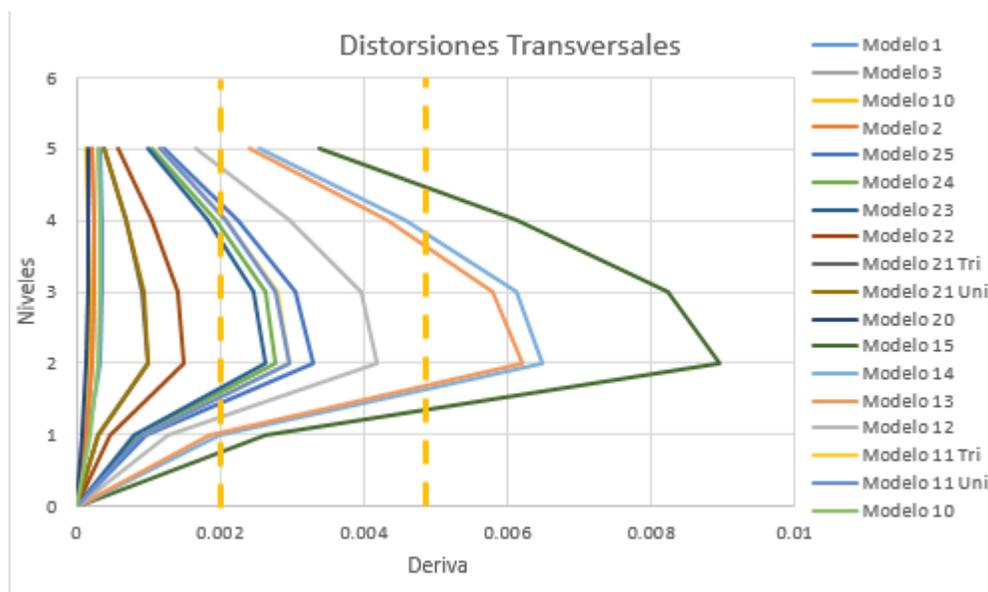


ILUSTRACIÓN 31 DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL.

En la ilustración 31 se observa que los casos 11Uni, 12, 23, 24 y 25 sobrepasan el límite de servicio, pero quedan por debajo del límite de falla. Los modelos 13, 14 y 15 sobrepasan el estado de falla y los modelos faltantes quedaron por debajo de ambos límites. Esta combinación resultó igual a la de la ilustración 28.

Para finalizar con las distorsiones, se observó que el mejor resultado fue para las distorsiones longitudinales en ambas combinaciones.

3.3 INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO

El agrietamiento siempre estará presente en el comportamiento de una estructura, es por eso que es importante considerar este factor en el análisis modal, ya que es necesario conocer el



comportamiento de la estructura en su condición más próxima a la real. Se consideraron diferentes factores de reducciones de inercia basados en diferentes reglamentos.

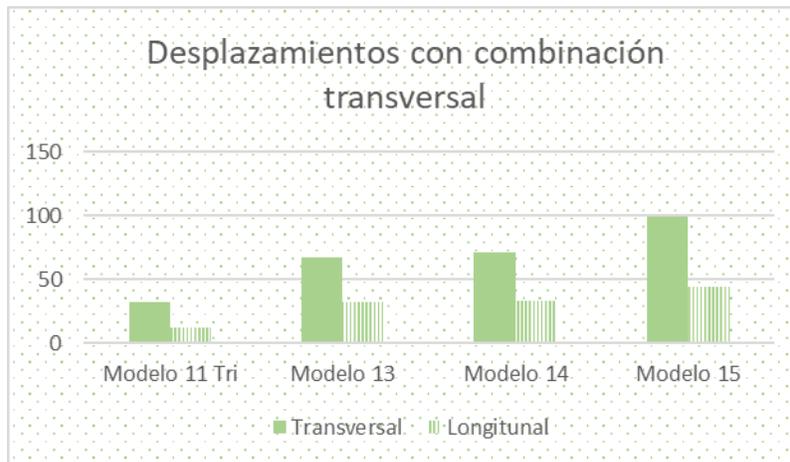


ILUSTRACIÓN 32. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS.

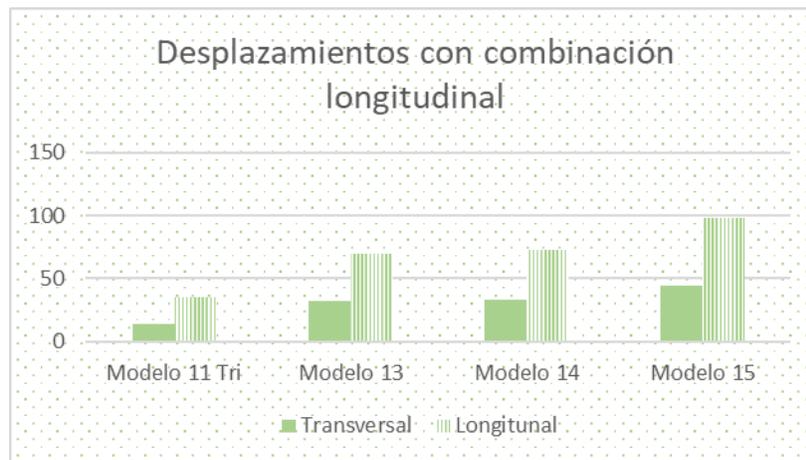


ILUSTRACIÓN 33. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS.

En las ilustraciones anteriores (33-32) se muestran los desplazamientos de 4 modelos únicamente. Estos modelos fueron seleccionados debido a que cada uno tiene un factor de agrietamiento diferente a excepción del modelo 11 con tres diagonales, ya que dicho modelo no tiene ningún factor de reducción en su inercia, pero se colocó en la gráfica para analizar los



cambios de desplazamientos con modelos que no tienen reducción y con otros que tienen factores distintos.

El modelo 13 es afectado por un factor de reducción tomando de las NTC 2017, el modelo 14 fue afectado por factores del código 318 del American Concrete Institute (ACI 318) y el modelo 15 fue afectado por factores del código 369 del American Concrete Institute (ACI 369). Se puede observar como los desplazamientos fueron aumentando y que el factor de agrietamiento más desfavorable fue el del ACI 369 y el más favorable fue el de las NTC 17.

El cambio entre el modelo 11 con tres diagonales y el modelo 15 en la combinación transversal en la dirección transversal es 3.05 veces mayor el modelo 15 y en la dirección longitudinal es 3.67 veces mayor. En la combinación longitudinal, la dirección la dirección transversal es 3.26 veces mayor el modelo 15 y en la dirección longitudinal es 2.81 veces mayor.

| Modelo | Columnas/Vigas/muros | Reglamento |
|--------|----------------------|------------|
| 1 | Bruta | NTC17 |
| 2 | Agr | NTC17 |
| 3 | Agr | NTC17 |
| 10 | Bruta | NTC17 |
| 11 | Bruta | NTC17 |
| 12 | Agr | NTC17 |
| 13 | Agr | NTC17 |
| 14 | Agr | ACI318 |
| 15 | Agr | ACI369 |
| 20 | Bruta | NTC17 |
| 21 | Bruta | NTC17 |
| 22 | Agr | NTC17 |
| 23 | Agr | NTC17 |
| 24 | Agr | ACI318 |
| 25 | Agr | ACI369 |

TABLA 5 ESPECIFICACIONES DEL FACTOR DE REDUCCIÓN EN CADA MODELO

En la tabla 5 se muestran cómo se vieron afectados las secciones de la estructura en cada modelo. A continuación, se analizarán las distorsiones en los casos más desfavorables que fue en la combinación longitudinal y en dirección longitudinal y en la combinación transversal en dirección transversal.

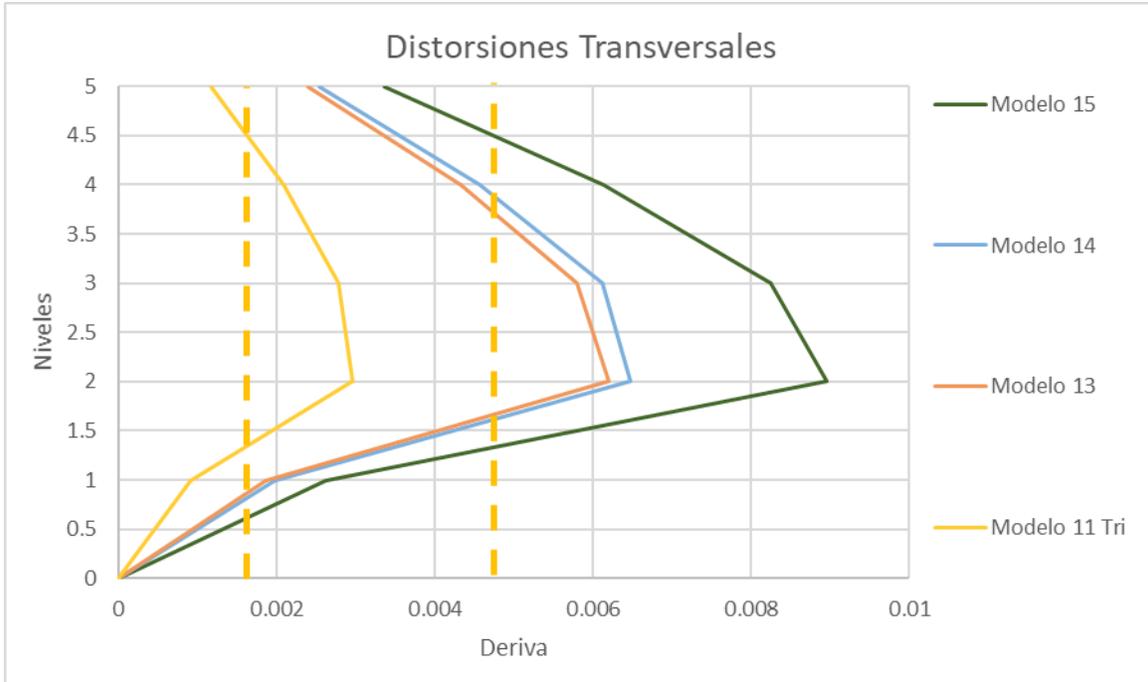


ILUSTRACIÓN 34. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL PARA ALGUNOS CASOS.

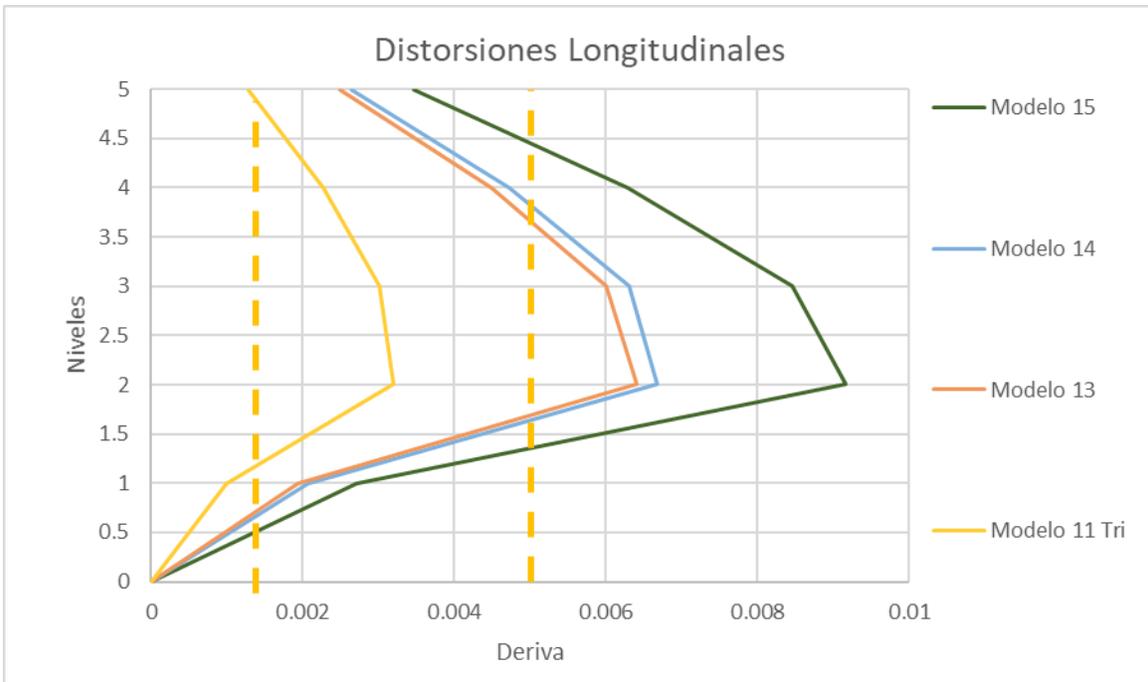


ILUSTRACIÓN 35. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA ALGUNOS CASOS.



Se puede analizar en las ilustraciones 35 y 34 que los modelos 13, 14 y 15 sobrepasan el límite de falla y solo el modelo 11 con 3 diagonales queda por debajo, sin embargo, pasa el límite de servicio aun cuando este modelo no está afectado por ningún factor de agrietamiento y la razón es por el espectro con el que se modeló. Cabe mencionar que los 4 modelos graficados en el apartado 3.3 son diseñados con el mismo espectro de diseño, recordando que es el de las NTC 2017.

3.4 MODELADO DE MUROS

| Modelo | Muros |
|--------|-----------------|
| 1 | Placas |
| 2 | Placas |
| 3 | Placas |
| 10 | Placas |
| 11 | Muros diafragma |
| 12 | Muros diafragma |
| 13 | Muros diafragma |
| 14 | Muros diafragma |
| 15 | Muros diafragma |
| 20 | Placas |
| 21 | Muros diafragma |
| 22 | Muros diafragma |
| 23 | Muros diafragma |
| 24 | Muros diafragma |
| 25 | Muros diafragma |

TABLA 6 MODELADO DE MUROS PARA CADA CASO.

Para el modelado de muros, algunos casos fueron modelados con muros tipo placa y otros con muros diafragma; es decir, con diagonales equivalentes los cuales se diseñaron en ETABS con elementos tipo link.

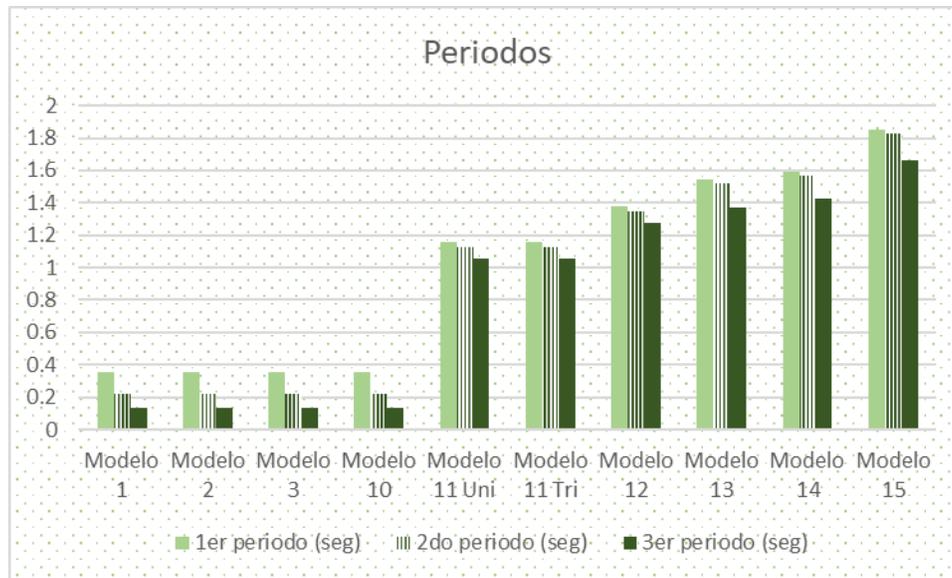


ILUSTRACIÓN 36. COMPARACIÓN DE PERIODOS EN SUS PRIMEROS 3 MODOS DE VIBRAR.

En la ilustración se muestra el resultado de los periodos para los primeros 15 modelos cada uno con sus primeros 3 modos de vibrar. Es importante mencionar que los modelos del 1 al 10 fueron diseñados con muros tipo placa y los modelos del 11 al 15 fueron diseñados con muros diafragma. Se puede apreciar un cambio bastante significativo entre los primeros casos y los últimos debido a que los muros diseñados con diagonales se vuelven mucho más flexibles. Comparando el modelo 15 con el modelo 1 resultó ser el 528% mayor al caso 1 de su primer modo de vibrar, el cual es muy alto. El modelo 1 tuvo un periodo de 0.3 seg, mientras que el modelo 15 obtuvo el periodo más alto con 1.81 seg, en su primer modo de vibrar.

CAPÍTULO 4. MODELADO DEL EDIFICIO REFORZADO

Como se mencionó en el capítulo 1, existen diferentes métodos de refuerzo sísmico o rehabilitación para una estructura. En este tema en estudio se utilizó el encamisado de concreto.

El encamisado de concreto se utiliza para reforzar un elemento que ha sufrido daños en su capacidad resistente, de forma que envuelve la sección dañada con una sección adicional de concreto armado, aumentando la sección y de esta forma también aumenta la resistencia axial, a flexión, a cortante y torsión.



Este tipo de refuerzo además de ser muy eficaz a comparación de otros métodos, resulta ser rápido en su ejecución y con un costo bajo.

Se realizó el encamisado de concreto ya que la idea de reforzar o rehabilitar una estructura es prolongar la vida útil de esta misma.

El encamisado de concreto ofrece varias ventajas:

- Compatibilidad entre el material original y el de refuerzo.
- Amplia superficie de contacto, la cual permite una adherencia entre el concreto nuevo y el original motivada por la retracción, la cual permite que las cargas se transmitan axialmente y por fricción entre los elementos.
- Conexión del acero de refuerzo original con el existente.
- Baja conductividad térmica, es decir, buena resistencia al fuego y buen aislamiento térmico para las armaduras.
- Posibilidades de dar acabados arquitectónicos por causa de concreto; de las cuales se obtiene un elemento monolítico. capaz de aumentar la resistencia y la rigidez del elemento original, sin cambiar su modo de acción con el tiempo. (Encamisado de concreto, 2021)

En el capítulo 2, apartado 2.3 se explican las especificaciones del refuerzo. En la figura 36 se muestra una columna del edificio antes de colocar el concreto nuevo de la camisa. Como se ve en la foto, el acero de refuerzo ya está habilitado. Estas son algunas características del reforzamiento utilizado:

- Las propiedades del material utilizadas para la reparación y el refuerzo de la estructura tenían las siguientes propiedades:

Resistencia del concreto $f'c$ 250 Kg / cm²

Acero de refuerzo f_y = 4200 Kg / cm²

- Dimensionamiento de columnas y vigas
Columnas: C1 60x60 y C2 50x50
Trabes: T1 60x35 y T2 20x30

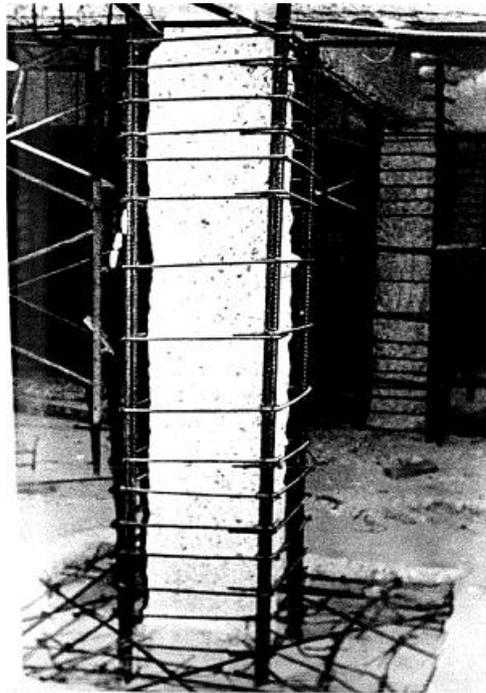


ILUSTRACIÓN 37. ENCAMISADO DE COLUMNAS EL EDIFICIO EN ESTUDIO.

4.2 MODELO NUMÉRICO

En este capítulo se analizó el edificio reforzado; es decir, con las modificaciones en su estructura que fueron realizadas en el edificio real, con el propósito de observar el comportamiento de la estructura con los cambios mencionados en el apartado anterior. Además, se utilizaron variables de distintos reglamentos y normas al igual que con el modelo original. Es importante destacar que dicho proceso fue propuesto por el proyecto Resiliencia Sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Se realizaron 24 modelos para la estructura original con ayuda del software ETABS, cada caso con distintas especificaciones de cargas, espectros, materiales, etc.

Todos los materiales, espectros, inercias, etc. Fueron los mismos que se utilizaron para el modelo original, lo único que cambió fue el dimensionamiento de la estructura.



4.2 ANÁLISIS MODAL

En el reforzamiento de la estructura también se utilizó el software ETABS para el análisis modal. El esqueleto del edificio de cada caso ya estaba hecho puesto que se utilizaron los mismos del edificio original y con base a ellos se modificaron las dimensiones de las secciones para el encamisado que se realizó, con estas modificaciones se analizó el comportamiento de cada uno de los casos en estudio. Como ya sabemos el análisis modal espectral es un método para estimar los desplazamientos y fuerzas en elementos de un sistema estructural, dicho esto con el modelado realizado se observaron los resultados de las aceleraciones resultantes, de los desplazamientos, distorsiones, cortantes, momentos, etc., las cuales se mostrarán a continuación detalladamente.

4.2.1 PERIODOS

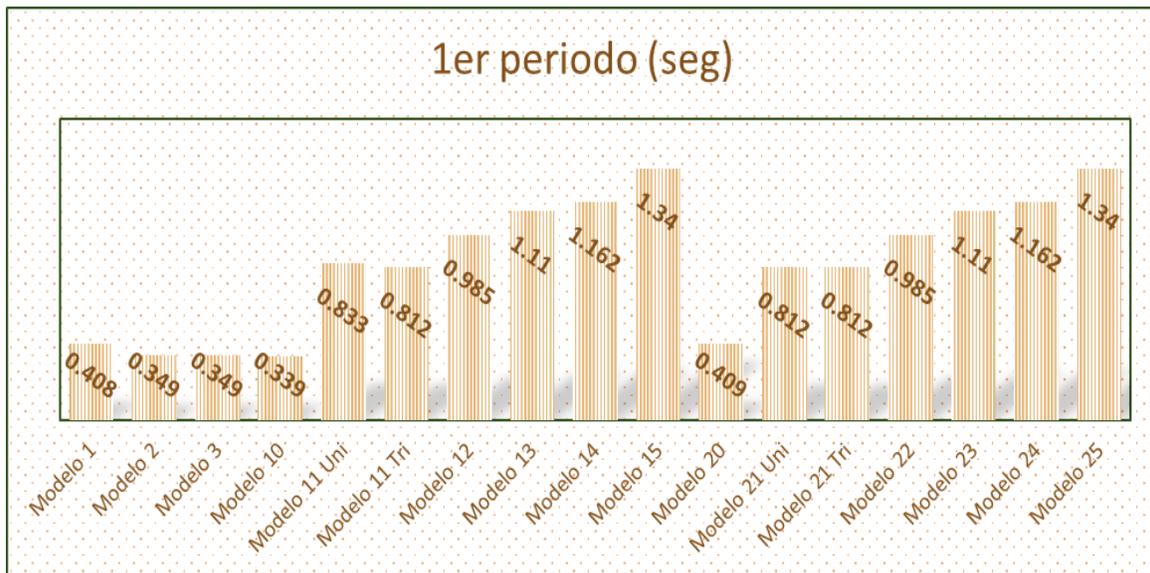


ILUSTRACIÓN 38. PRIMER MODO DE VIBRAR DEL EDIFICIO REHABILITADO.

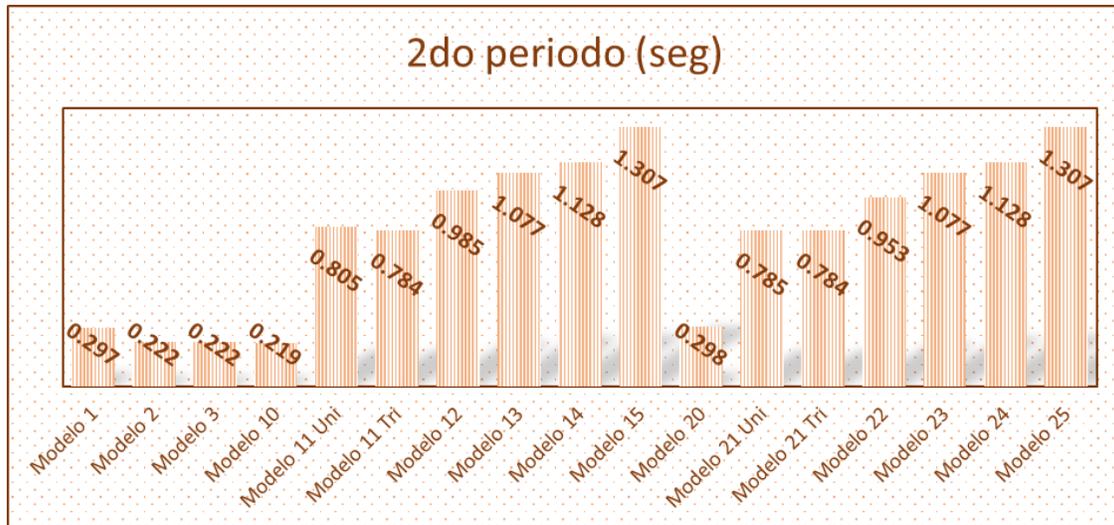


ILUSTRACIÓN 39. SEGUNDO MODO DE VIBRAR DEL EDIFICIO REHABILITADO.

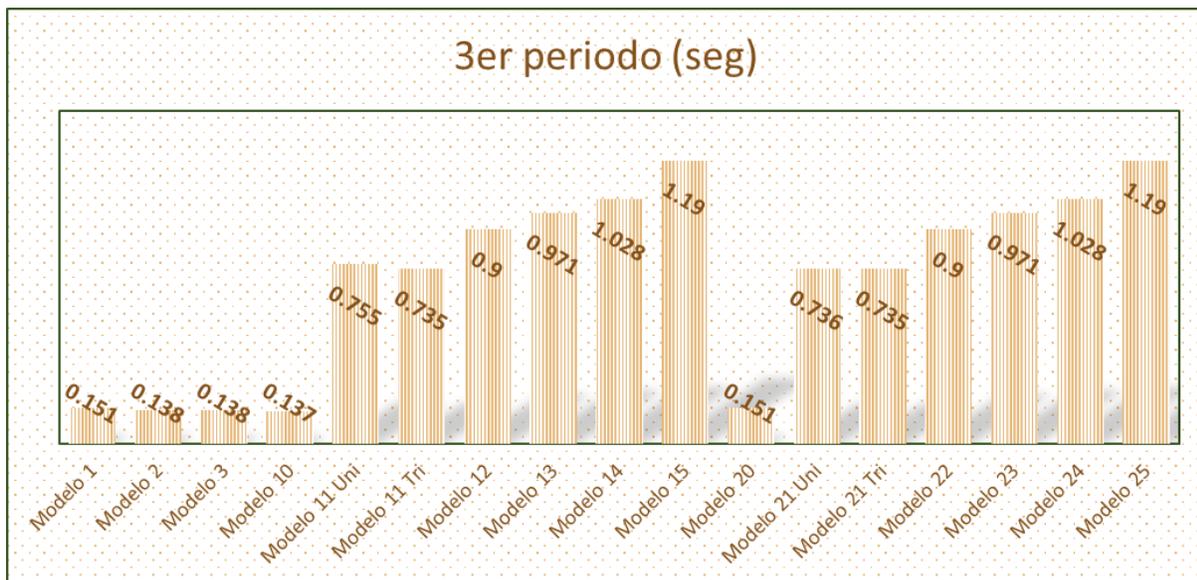


ILUSTRACIÓN 40. TERCER MODO DE VIBRAR DEL EDIFICIO REHABILITADO.

Como se puede observar en las 3 figuras anteriores, los periodos se incrementan a partir del modelo 11, ya que a partir de ese modelo fueron diseñados con muros diafragma o, dicho en otras palabras, con diagonales equivalentes por lo que se hacen más flexibles que con el uso de elementos placa como ya se ha mencionado en capítulos anteriores.



Se puede observar que conforme avanzan los modos de vibrar, van disminuyendo los periodos. Si comparamos los periodos de los modelos del primer modo de vibrar con los del tercer modo, se disminuyen en una tercera o cuarta parte.

También es importante mencionar que los modelos del 20 al 25 son iguales a los modelos del 10 al 15, es por eso que, en esta gráfica, ni en las gráficas del capítulo anterior se ha mostrado los otros 7 casos con el espectro de la SCT, debido a que saldrán los mismos resultados, los cuales se mencionarán en el capítulo 5.

En estos modelos se hicieron las mismas reducciones de inercias, sin embargo, a comparación con los modelos originales se logra apreciar una reducción en los periodos de los modelos del 11 al 25.

4.2.2 DESPLAZAMIENTOS

“Todas las estructuras se deforman al ser cargadas, y el cambio de configuración geométrica hace que sus puntos experimenten pequeños desplazamientos. En la mayoría de los casos esa deformación no es apreciable a simple vista, y entonces el observador la pasa por alto y asume que la estructura es completamente rígida; pero en la realidad todos los materiales se deforman, en mayor o menor medida.

Cuando se analiza una estructura siempre resulta necesario prestar atención a las deformaciones. A veces se piensa, erróneamente, que es suficiente obtener los esfuerzos internos y conocer las tensiones que se producen en los distintos puntos del sistema para que el estudio quede completado. Pero eso es solamente una parte del problema: hace falta también estudiar lo que sucede con las deformaciones, para comprobar si se hallan o no dentro de límites aceptables.

De hecho, con frecuencia es necesario dar a una pieza una sección mayor que la obtenida al estudiar las tensiones, con el objeto de volverla menos deformable. En tales casos, el dimensionamiento resulta definido por la rigidez, no por la resistencia.” (Kaufmann, 2003)

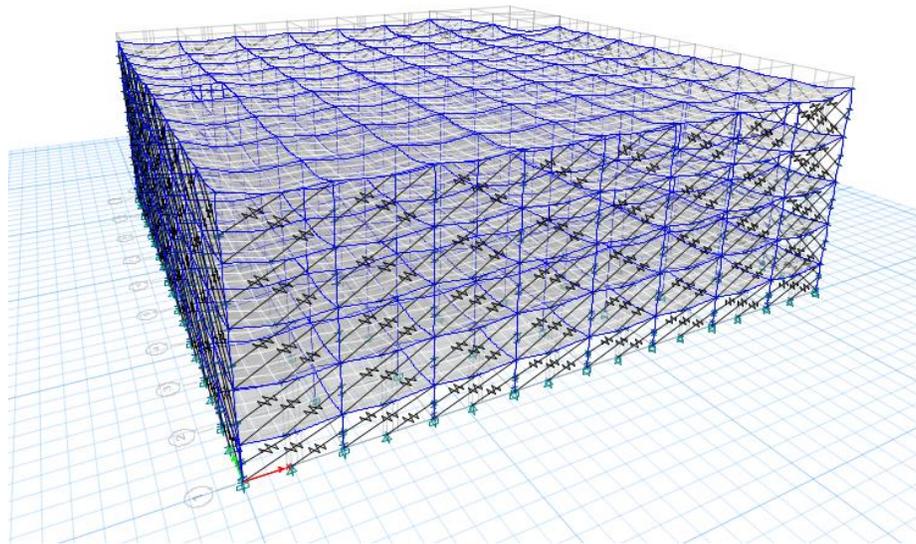


ILUSTRACIÓN 41. MODELO CON DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS

En la ilustración 41 se puede observar una simulación de las deformaciones y los desplazamientos que tiene la estructura tras haber sido rehabilitado y podemos observar cómo es que son deformaciones menores aun cuando la simulación exagera un poco estos cambios precisamente para que puedan ser visualizados de manera más fácil. El modelo mostrado es el modelo 11 con tres diagonales, uno de los modelos más flexibles que se modelaron.

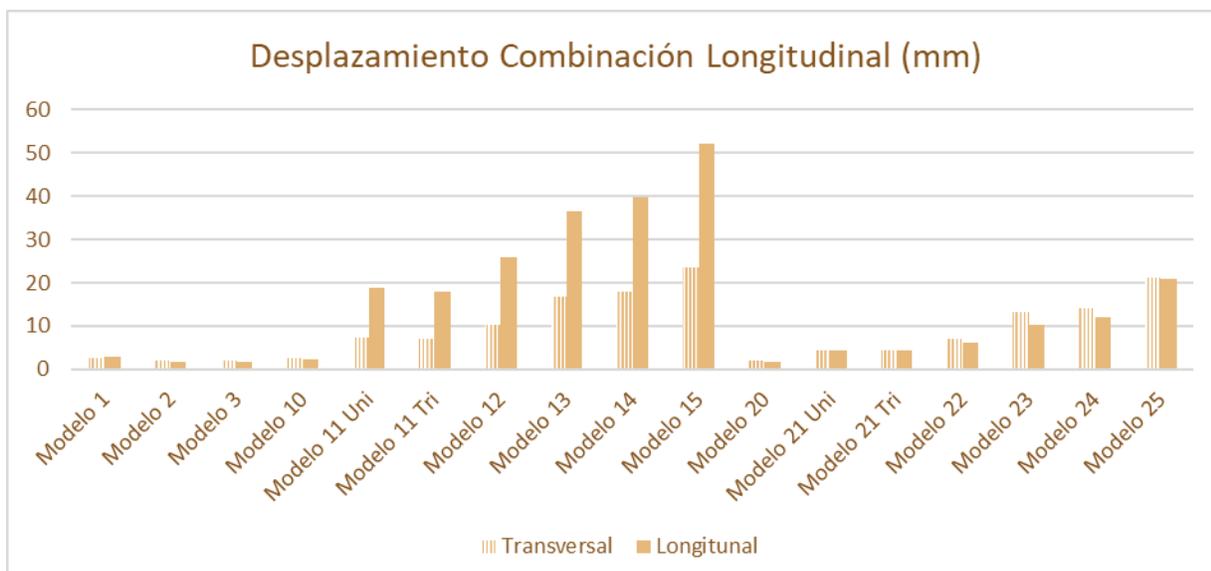


ILUSTRACIÓN 42. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL DEL EDIFICIO REHABILITADO.

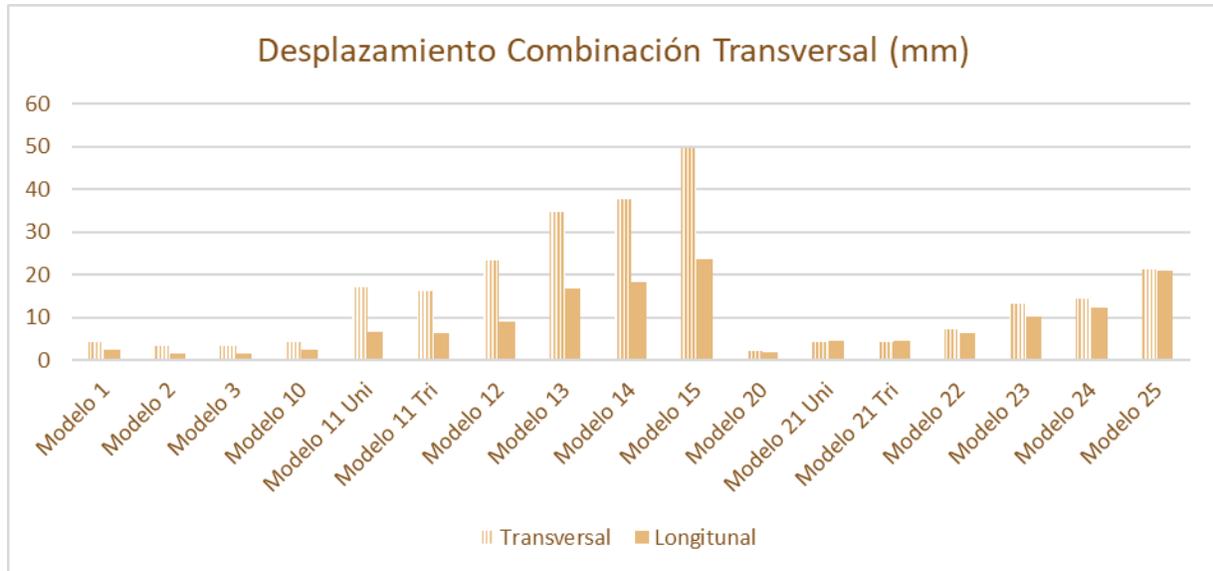


ILUSTRACIÓN 43. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL DEL EDIFICIO REHABILITADO.

Los desplazamientos están marcados en mm. y todos los desplazamientos fueron tomados del último nivel; es decir, el nivel 5. En las ilustraciones anteriores se puede ver como los primeros casos del 1 al 10, son bastante pequeños los cuales no pasan de 10 mm. y que a partir del modelo 11, los desplazamientos comienzan a incrementar debido a que estos modelos tienen el espectro de diseño de la NTC 17 y como ya habíamos comparado en el modelo original los modelos con este espectro se incrementan los desplazamientos, sin embargo, los desplazamientos a comparación del modelo original, disminuyeron en un 50%.

Los desplazamientos del modelo del 20 al 25 son menores a los modelos del 10 al 15 debido a que se cambió de espectro y también redujeron su desplazamiento en un 50% comparándolo con el modelo original.



4.2.3 DISTORSIONES

En las siguientes ilustraciones se mostrarán las distorsiones de los modelos rehabilitados con los límites establecidos por la NTC 2017, de 0.002 para límite de servicio y 0.005 para límite de colapso.

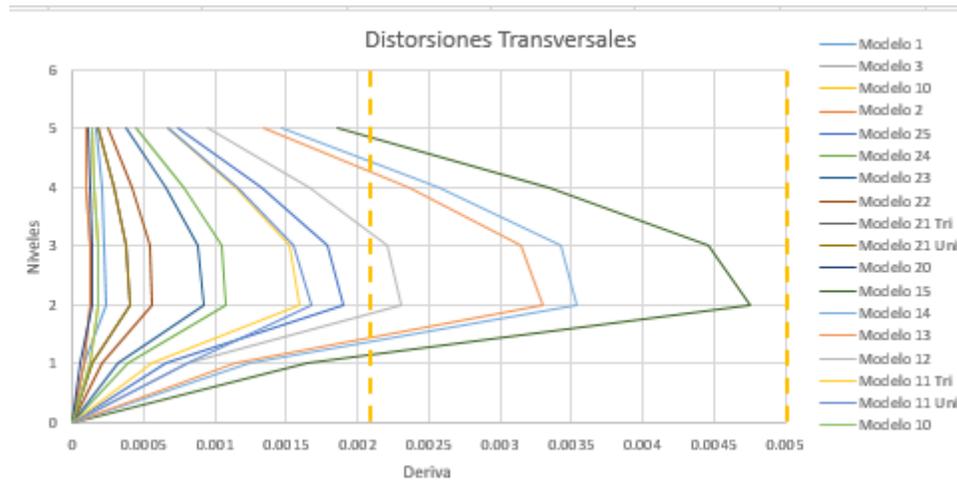


ILUSTRACIÓN 44. DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS.

En la ilustración 44 se puede observar que la mayor parte de los modelos quedaron por debajo de los límites de servicio y de colapso. Los modelos 12, 13, 14 y 15 quedaron por debajo del límite de colapso, sin embargo, pasaron el límite de servicio. Cabe mencionar que estos modelos fueron diseñados con 3 diagonales y que tienen el espectro de diseño de las NTC 17, por lo que se puede entender que debido a estas dos características fueron los modelos con más distorsión.

Es importante saber que fueron los modelos del 22 al 25 los que quedaron por debajo del límite de servicio puesto que, aunque prácticamente tienen las mismas características de los modelos del 12 al 15, estos casos se diseñaron con otro espectro de diseño.

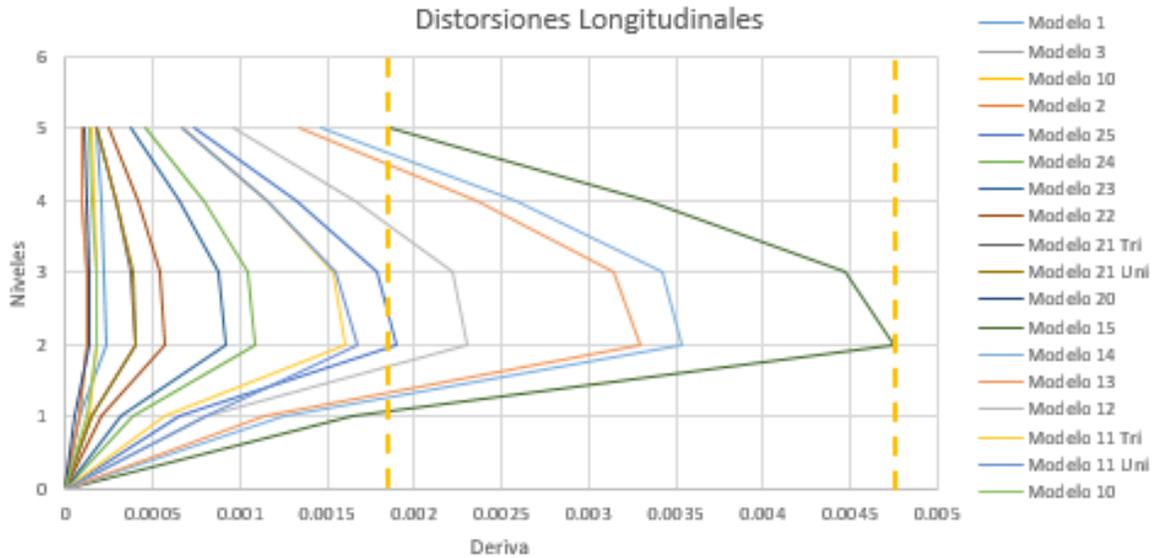


ILUSTRACIÓN 45. DISTORSIONES LONGITUDINALES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS.

En la ilustración 45 se observan las distorsiones transversales de la combinación longitudinal. En esta combinación resultó muy similar en cuanto a los modelos de las distorsiones longitudinales, se puede observar que el modelo 15 quedó justo en el límite de colapso, pero no lo sobrepasó, mientras que los modelos 12, 13, 14 y 25 quedaron por debajo del límite de colapso, pero por encima del límite de servicio. En el sentido longitudinal el modelo 25 había quedado por debajo del límite de servicio y en este sentido lo sobrepasó. Los modelos restantes quedaron por debajo de ambos límites.

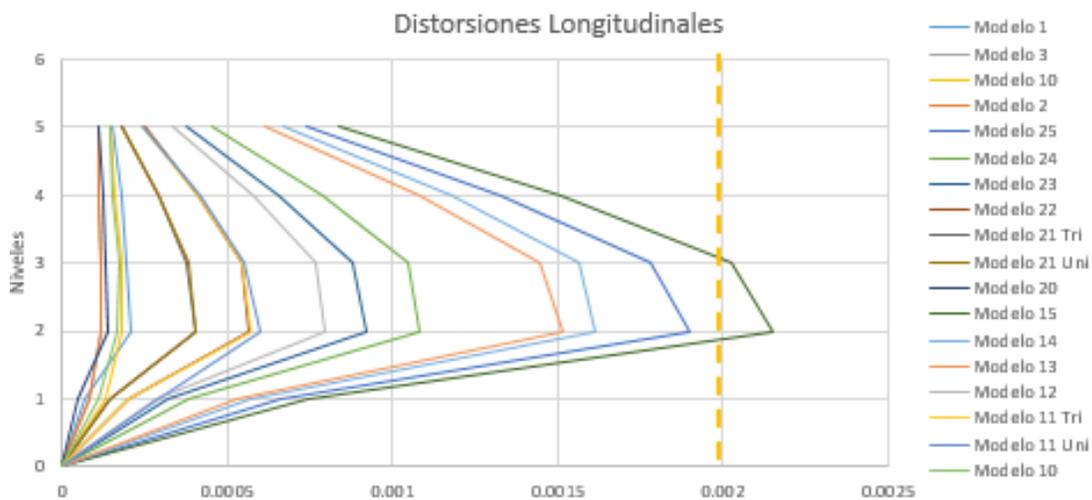


ILUSTRACIÓN 46. DISTORSIONES LONGITUDINALES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS.



En las distorsiones longitudinales de la combinación transversal, las cuales se muestran en la ilustración 46, se puede observar que todos los modelos, excepto el modelo 15, quedan por debajo del límite de servicio y del límite de colapso, mientras que el modelo 15 pasa el límite de servicio, pero queda por debajo del límite de colapso.

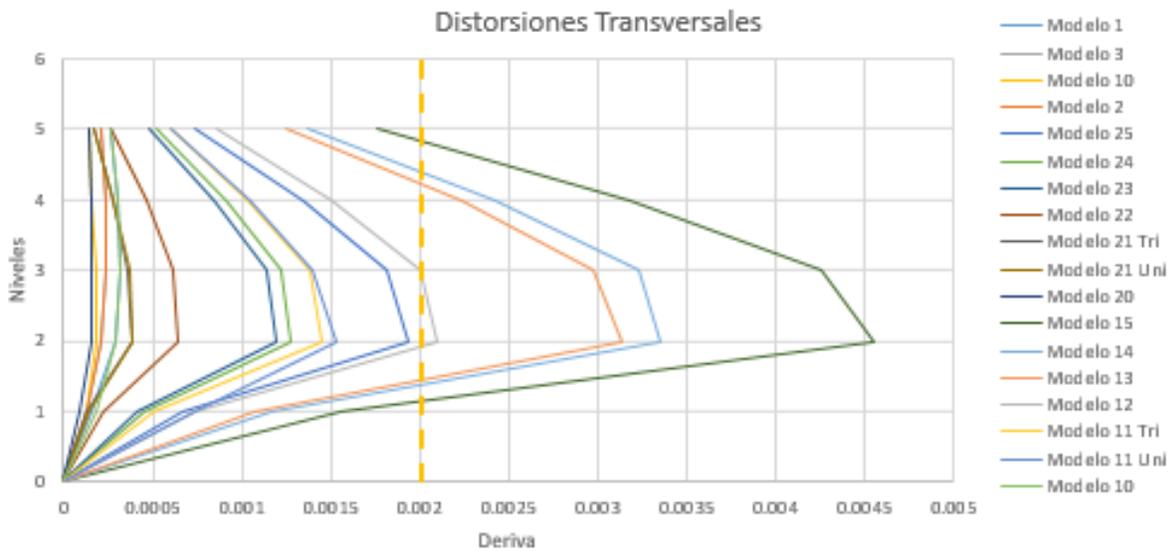


ILUSTRACIÓN 47 DISTORSIONES TRANSVERSALES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS.

Por último, se muestran en la figura 47 las distorsiones transversales con combinación transversal y se puede apreciar que es similar a la ilustración 43. Los modelos que pasan el límite de servicio son los siguientes: 12, 13, 14 y 15 y los modelos restantes quedan por debajo del límite de servicio y del límite de colapso.

Para concluir con las distorsiones, es importante mencionar que en los modelos rehabilitados en cualquier combinación y en cualquier dirección, ninguno sobrepasó el límite de colapso.



4.2.4 CORTANTE

Uno de los objetivos del análisis estructural es determinar la capacidad de soporte frente a cargas para las cuales fue diseñada una estructura y para determinar las dimensiones de la sección más adecuada para resistir estas solicitaciones. Por lo que, en el modelo rehabilitado fue lo que se hizo y en la siguiente ilustración veremos las fuerzas cortantes que resultaron tras haber incrementado las secciones de vigas y columnas. El por lo que se mencionó anteriormente, es uno de los elementos más importantes a analizar. Es importante destacar, que los cortantes que se mencionarán son de las columnas.

Cabe mencionar que los resultados del cortante están en toneladas.

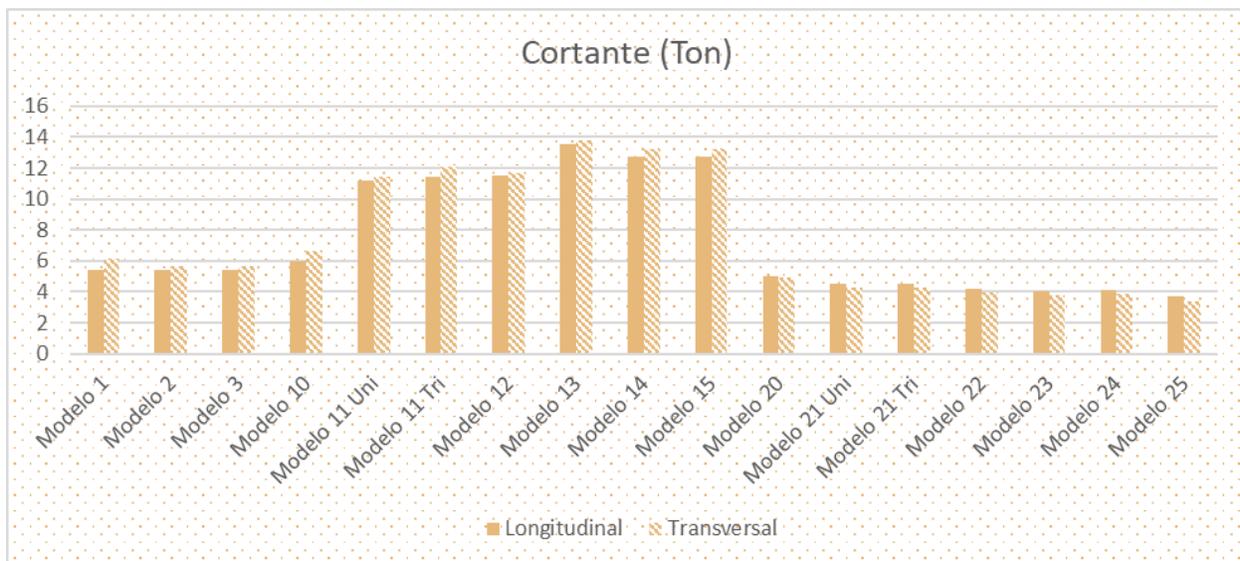


ILUSTRACIÓN 48. CORTANTE DE LOS MODELOS REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL.

Como se puede observar en la ilustración anterior se puede observar que hay tres comportamientos distintos. Los primeros modelos del 1 al 10 tienen cortantes menores de 7 toneladas, recordando que cada sección que se alcanza a percibir tiene características distintas en cuanto a reducciones de inercia, propiedades de los materiales y espectros distintos.

La segunda sección de modelos que en todos los casos han obtenido los resultados más altos y en esta gráfica también obtuvieron los resultados más altos que son los modelos del 11 al



15, obtuvieron cortantes de hasta casi 14 toneladas. Y los modelos del 20 al 25 fueron los que tuvieron cortantes más pequeños de 4 a 5 ton.

Se puede ver que de los modelos del 1 al 15 las cortantes transversales son mayores que los cortantes longitudinales, mientras que en los modelos del 20 al 25, las cortantes longitudinales son mayores que los cortantes transversales, debido al cambio de espectro que se utilizó en estos últimos casos.

4.2.5 FLEXOCOMPRESIÓN

En este apartado se analizarán los elementos mecánicos como momentos y carga axial, ya que estos son esfuerzos a los que son sometidos los elementos de una estructura como las columnas.

Una carga axial es una fuerza paralela al eje de simetría de un elemento de una estructura y esta fuerza puede estar a compresión o a tensión. A continuación, se mostrarán las cargas axiales y los momentos de cada modelo de la estructura rehabilitada.

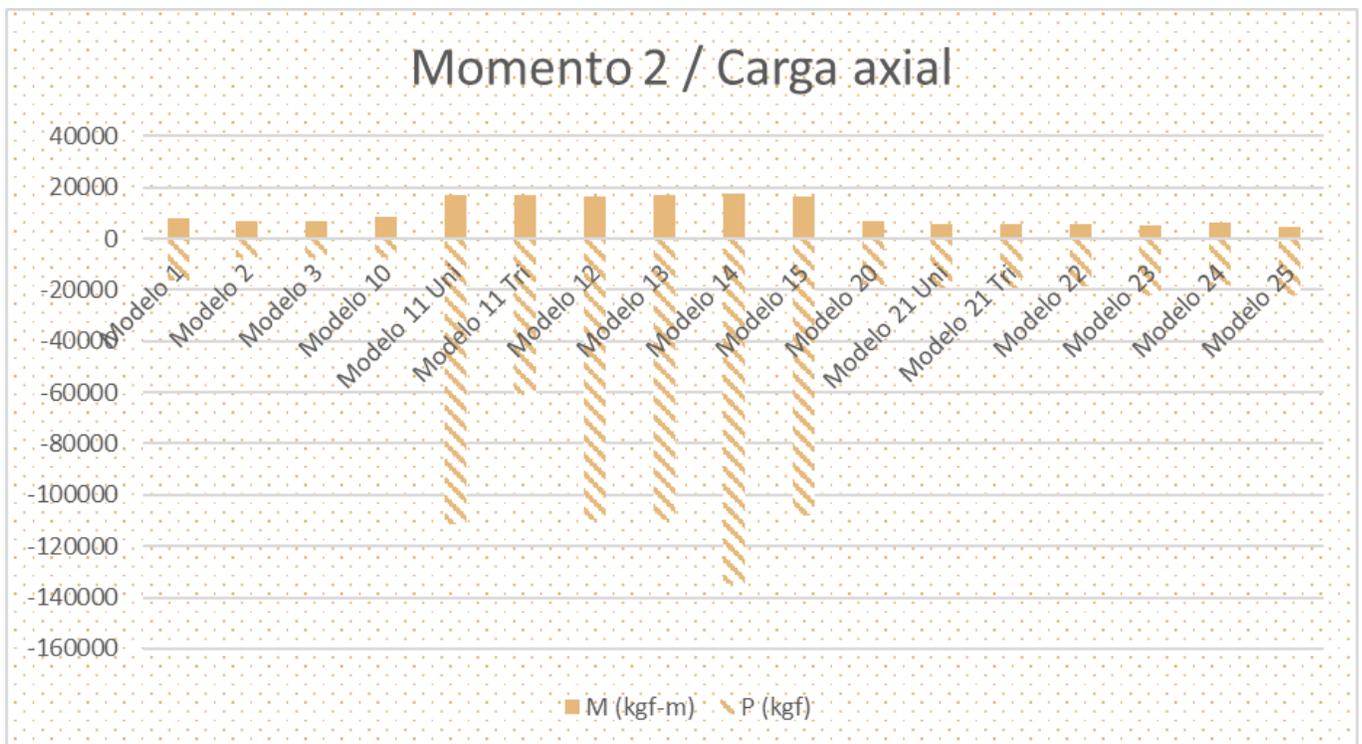


ILUSTRACIÓN 49. MOMENTOS EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL Y CARGA AXIAL.



En la ilustración anterior se pueden observar los momentos (M) en dirección transversal y su componente de carga axial (P). Los momentos como se pueden apreciar en la ilustración son más pequeños en los modelos del 1 al 10 y del 20 al 25. Por otro lado, los modelos del 11 al 15 tienen momentos más elevados, aunque son mínimos. Las cargas axiales son mayores también en los modelos centrales debido a la demanda sísmica y a las propiedades que se le dio a los materiales.

El modelo 14 tiene la mayor carga axial (P) de 134,536.17 kg y un momento (M) de 17494.84 kg-m.

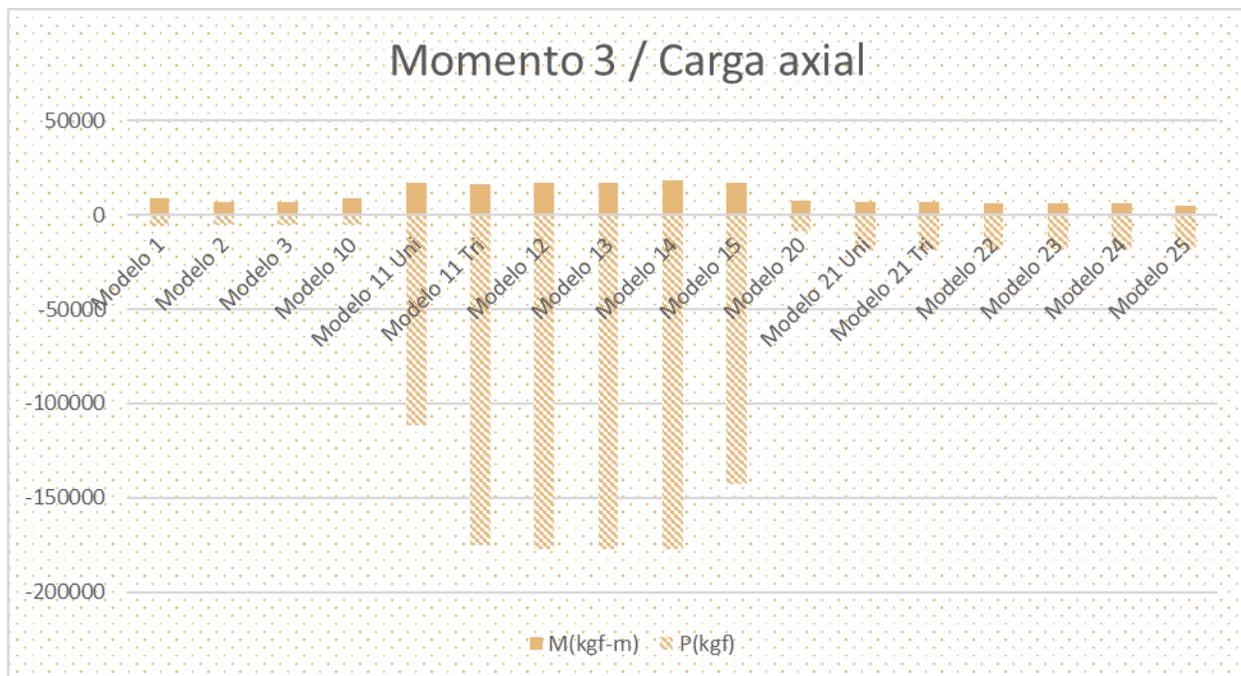


ILUSTRACIÓN 12. MOMENTOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL Y CARGA AXIAL

Por otro lado, en la ilustración 50 se pueden observar los momentos (M) en dirección longitudinal y su componente de carga axial (P). Los momentos se siguen manteniendo menores en los extremos; es decir, los modelos del 1 al 10 y del 20 al 25. Mientras que los modelos del 11 al 15 tienen momentos más elevados, aunque son mínimos. Las cargas axiales son mayores también en los modelos centrales por la demanda sísmica y las propiedades que se les dio a los materiales.



Se puede observar que las cargas axiales de los modelos 11Tri, 12, 13 y 14 son los que tuvieron una carga axial más elevada y están prácticamente al mismo nivel, con una carga (P) que ronda entre los 177 000 kg.

4.3 INFLUENCIA DEL AGRIETAMIENTO

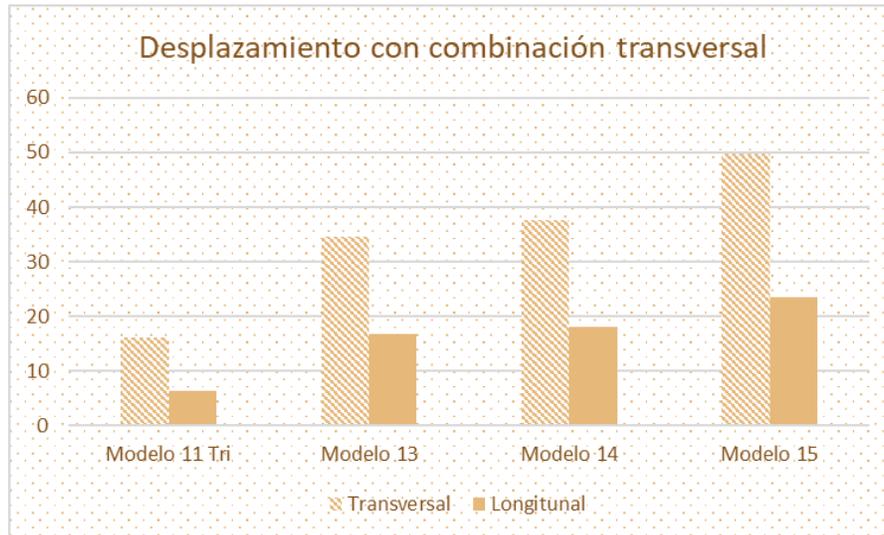


ILUSTRACIÓN 51. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN TRANSVERSAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS PARA EL EDIFICIO REHABILITADO.

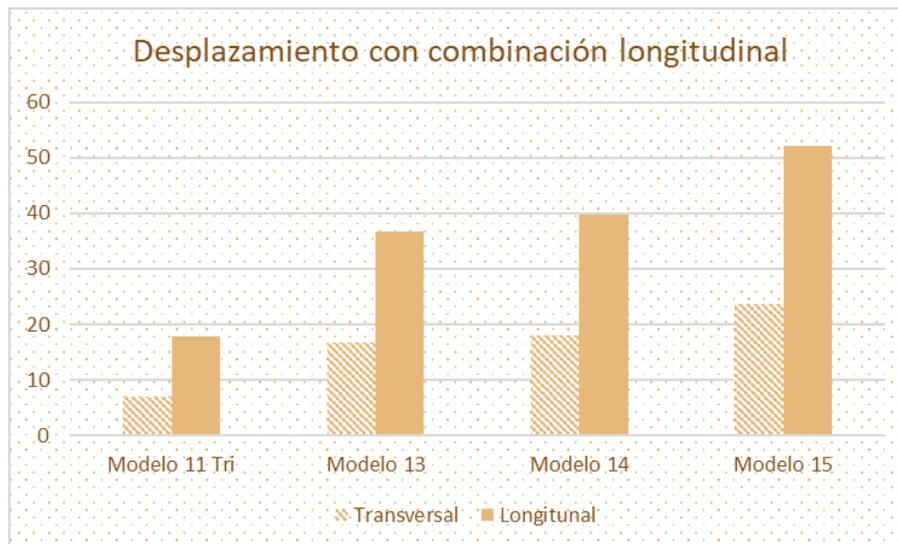


ILUSTRACIÓN 52. DESPLAZAMIENTOS CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON MODELOS CON ESPECTRO DE NTC 17, CON FACTORES DE AGRIETAMIENTO DISTINTOS PARA EL EDIFICIO REHABILITADO.



En las ilustraciones anteriores se muestran los desplazamientos de 4 modelos rehabilitados. Estos modelos fueron seleccionados debido a que cada uno tiene un factor de agrietamiento diferente a excepción del modelo 11 con tres diagonales, ya que dicho modelo no tiene ningún factor de reducción en su inercia, pero se colocó en la gráfica para analizar los cambios de desplazamientos con modelos que no tienen reducción y con otros que tienen factores distintos, al igual que con los modelos originales.

El modelo 13 es afectado por un factor de reducción tomando de las NTC 2017, el modelo 14 fue afectado por factores del código 318 del American Concrete Institute (ACI 318) y el modelo 15 fue afectado por factores del código 369 del American Concrete Institute (ACI 369). Se puede observar como los desplazamientos fueron aumentando y que el factor de agrietamiento más desfavorable fue el del ACI 369 (modelo 15) y el más favorable fue el de las NTC 17 (modelo 13).

Comparando los incrementos de los desplazamientos de los modelos con respecto a uno y otro espectro y los factores de agrietamiento, en la dirección transversal es 3.09 veces mayor el modelo 15 y en la dirección longitudinal es 3.07 veces mayor. En la combinación longitudinal, la dirección la dirección transversal es 3.33 veces mayor el modelo 15 y en la dirección longitudinal es 2.93 veces mayor.

Los modelos fueron afectados por los mismos factores de reducción que los modelos originales, como se muestra en la tabla 5 del capítulo 3.

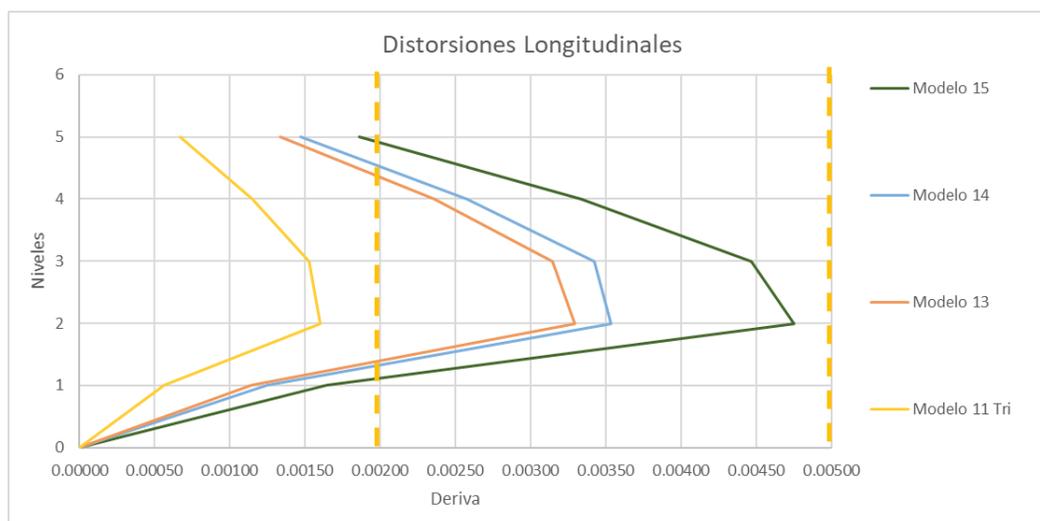


ILUSTRACIÓN 53. DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN LONGITUDINAL EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA ALGUNOS CASOS.

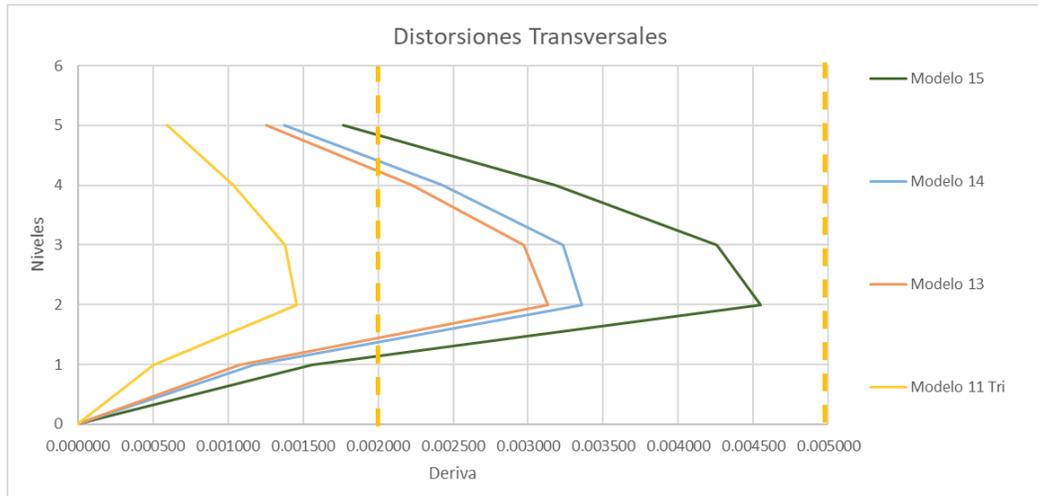


ILUSTRACIÓN 15 DISTORSIONES PARA COMBINACIÓN TRANSVERSAL EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL PARA ALGUNOS CASOS.

Se puede observar en las ilustraciones anteriores, que el modelo 11 con tres diagonales tanto en la combinación longitudinal como en la combinación transversal queda por debajo del límite de servicio y del límite de colapso. Este modelo no fue afectado por un factor de agrietamiento; es decir, su inercia no se modificó.

Por otro lado, los modelos 13, 14 y 15 que fueron afectados por distintos factores de agrietamiento (factores tomados de distintos reglamentos), se quedaron por debajo del límite de colapso, pero sobrepasaron el límite de servicio.

4.4 MODELADO DE MUROS

El modelado de muros se basó en la tabla 6 del capítulo 3. Los muros fueron diseñados de la misma manera en que fueron modelados para el sistema original, los modelos 1, 2, 3, 10 y 20 se diseñaron con muros tipo placas y los modelos restantes se diseñaron con muros diafragma.

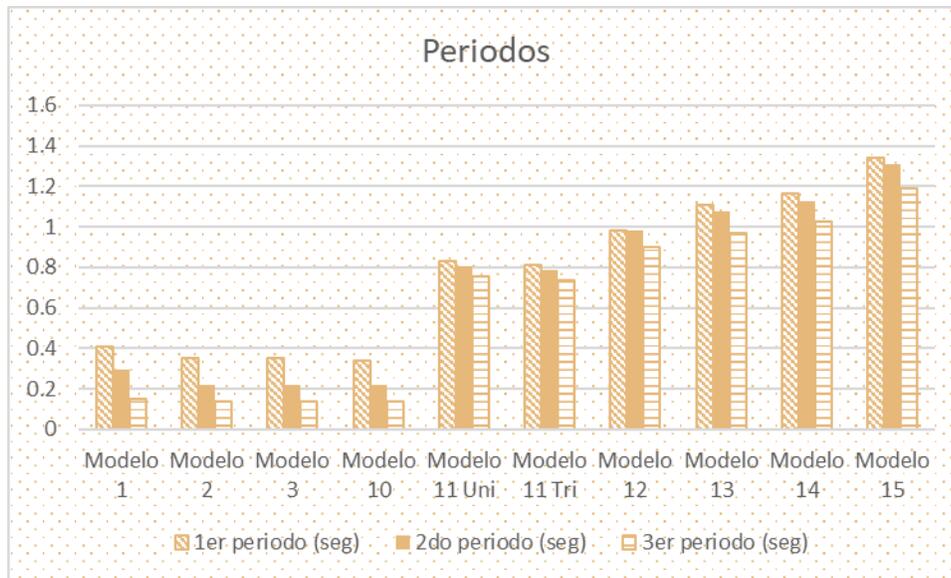


ILUSTRACIÓN 16. COMPARACIÓN DE PERIODOS EN SUS PRIMEROS 3 MODOS DE VIBRAR DE LA ESTRUCTURA REHABILITADA.

Se puede analizar en la ilustración 55 que los modelos iniciales son los más pequeños en sus 3 primeros modos de vibrar, debido al modelado de muros con los que se diseñaron y a sus especificaciones y que los modelos del 11 al 15 son mucho más grandes que los iniciales ya que como ya se ha comentado, los modelos con diagonales se vuelven más flexibles.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DEL EDIFICIO ORIGINAL Y REFORZADO PARA DISTINTAS DEMANDAS SÍSMICAS

En esta tesis se trabajaron 4 espectros diferentes, los cuales se explicarán a continuación y se analizarán los resultados de periodos, distorsiones, desplazamientos y cortantes de cada uno comparando los modelos originales con los rehabilitados.



| Modelo | Referencia | Condición estructura | Espectro |
|--------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 | NA | Original/Rehabilitado | Espectro diseño original |
| 2 | Secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro diseño original |
| 3 | Secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro diseño original |
| 10 | NA | Original/Rehabilitado | Espectro NTC 17 |
| 11 | Placas vs diagonales | Original/Rehabilitado | Espectro NTC 17 |
| 12 | Secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro NTC 17 |
| 13 | Ec | Original/Rehabilitado | Espectro NTC 17 |
| 14 | Factores secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro NTC 17 |
| 15 | Factores secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro NTC 17 |
| 20 | NA | Original/Rehabilitado | Espectro registro 19S |
| 21 | Placas vs diagonales | Original/Rehabilitado | Espectro registro 19S |
| 22 | Secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro registro 19S |
| 23 | Ec | Original/Rehabilitado | Espectro registro 19S |
| 24 | Factores secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro registro 19S |
| 25 | Factores secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro registro 19S |
| 20 | NA | Original/Rehabilitado | Espectro registro SCT |
| 21 | Placas vs diagonales | Original/Rehabilitado | Espectro registro SCT |
| 22 | Secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro registro SCT |
| 23 | Ec | Original/Rehabilitado | Espectro registro SCT |
| 24 | Factores secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro registro SCT |
| 25 | Factores secc agr | Original/Rehabilitado | Espectro registro SCT |

ILUSTRACIÓN 56. ESPECTROS UTILIZADOS PARA CADA MODELO.

5.1 ESPECTRO DE DISEÑO ORIGINAL

El primer espectro del que se analizarán los resultados fue tomado de las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal del año 1966, el cual fue un valor de 0.06 g. Este espectro fue utilizado para los 3 primeros modelos.



5.1.1 PERIODOS

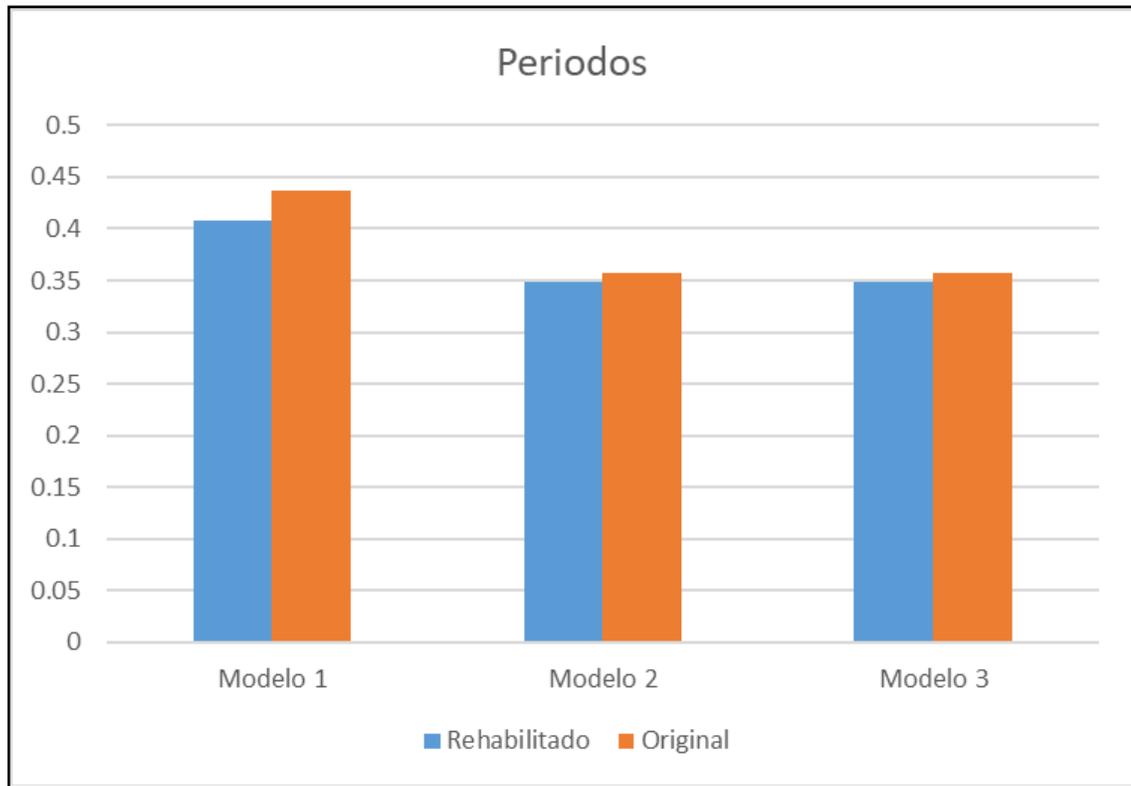


ILUSTRACIÓN 17. PERIODOS PARA MODELOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO ORIGINAL

En la ilustración 57 se pueden observar una comparación entre los 3 primeros modelos originales contra los rehabilitados. Se seleccionaron los valores del primer modo de vibrar y como ya se mencionó, estos modelos tienen el espectro original con valor de 0.06 g.

Como se ve en la ilustración los valores no varían tanto entre modelos originales y rehabilitados, pero los modelos originales son mayores que los rehabilitados; es decir, que la rehabilitación fue óptima en los periodos ya que disminuyeron en un 6.63%, es un porcentaje bajo, pero es importante saber que los primeros modelos fueron diseñados con placas y que son los modelos más rígidos de todos, es por eso que no muestran cambios tan grandes.



5.1.2 DESPLAZAMIENTOS

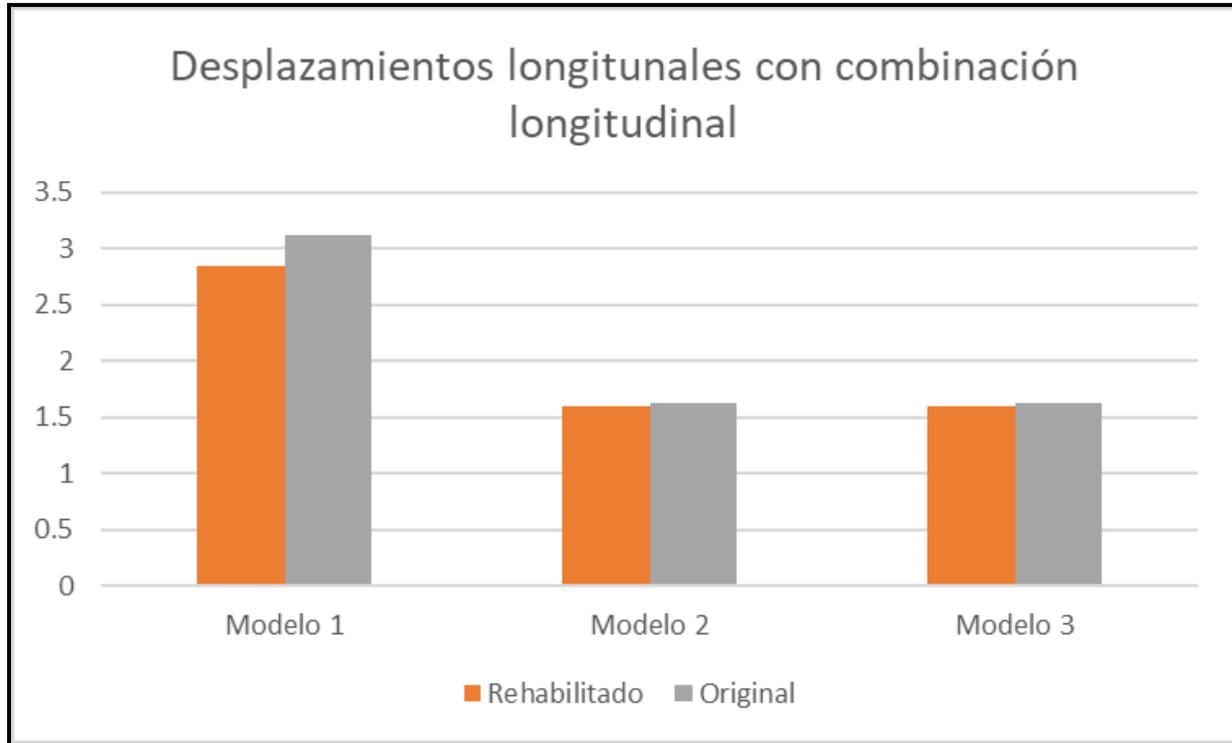


ILUSTRACIÓN 58. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL

En la ilustración 58 se pueden observar los resultados de los desplazamientos en dirección longitudinal con combinación longitudinal para los modelos 1, 2 y 3 originales y rehabilitados con espectro original. Los resultados están en mm, por lo que el mayor desplazamiento fue en el modelo 1 original con poco más de 3 mm. Los desplazamientos en estos modelos son mínimos, debido a que la estructura en estudio es muy regular, además de que los primeros modelos tienen características que la hacen rígida y no tan inestable.

Sin embargo, los modelos originales son mayores que los rehabilitados, donde se puede observar más el cambio es en el modelo 1, puesto que los modelos 2 y 3 son prácticamente iguales.



5.1.3 DISTORSIONES

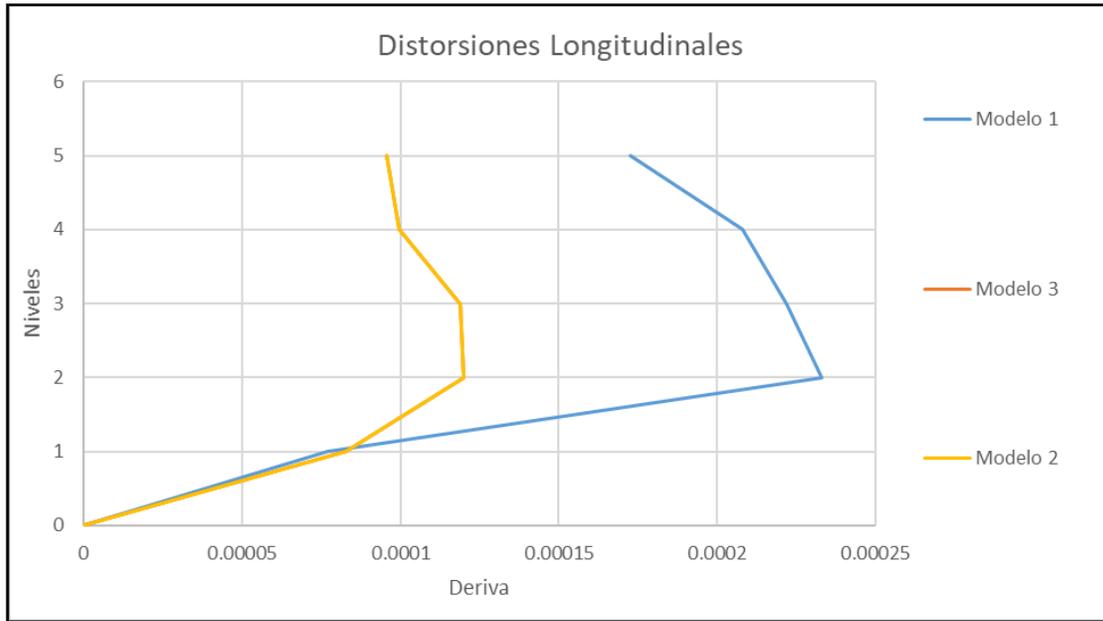


ILUSTRACIÓN 59. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES.

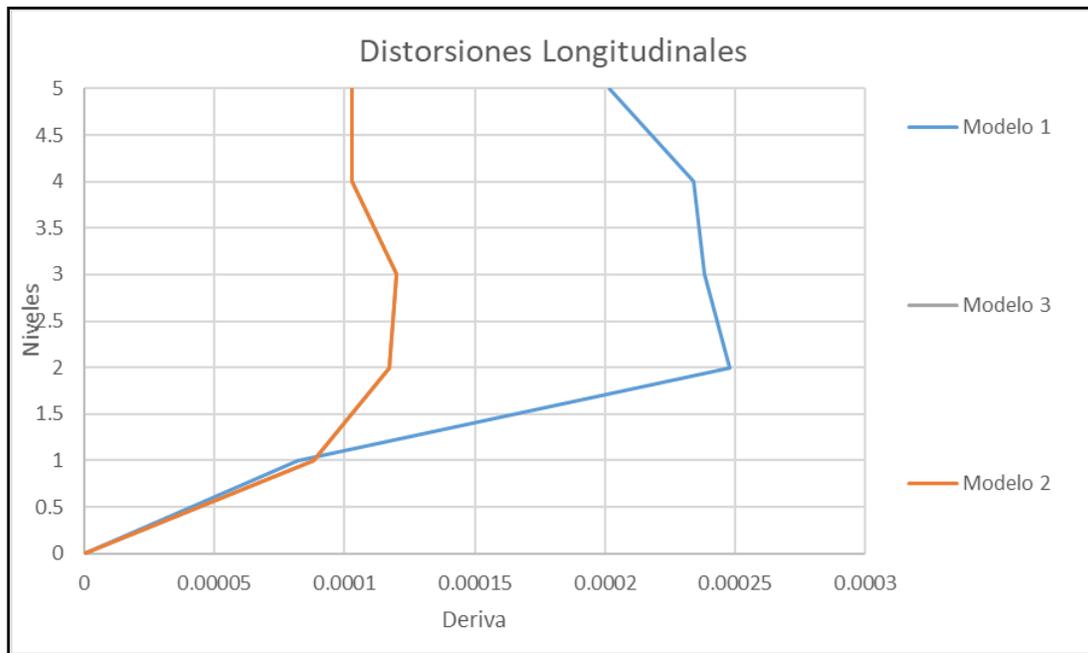


ILUSTRACIÓN 60. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 1, 2 Y 3 REHABILITADOS.



En las ilustraciones anteriores se pueden observar las distorsiones tanto para los modelos originales como los rehabilitados. Es importante mencionar que la dirección y combinación que se muestran son las que obtuvieron los resultados más desfavorables.

En la ilustración 58 y 59, se muestran los resultados de los modelos 1, 2 y 3 en dirección longitudinal con combinación longitudinal de la estructura original. Los modelos 2 y 3 presentaron los mismos resultados por lo que están juntos.

Los límites establecidos por las Normas Técnicas Complementarias del 2017 son para límite de servicio de 0.002 y para límite de colapso de 0.005. En los modelos 1, 2 y 3 para rehabilitados y originales, no sobrepasaron ninguno de estos dos límites, quedaron muy por debajo de ellos.

5.1.4 CORTANTE

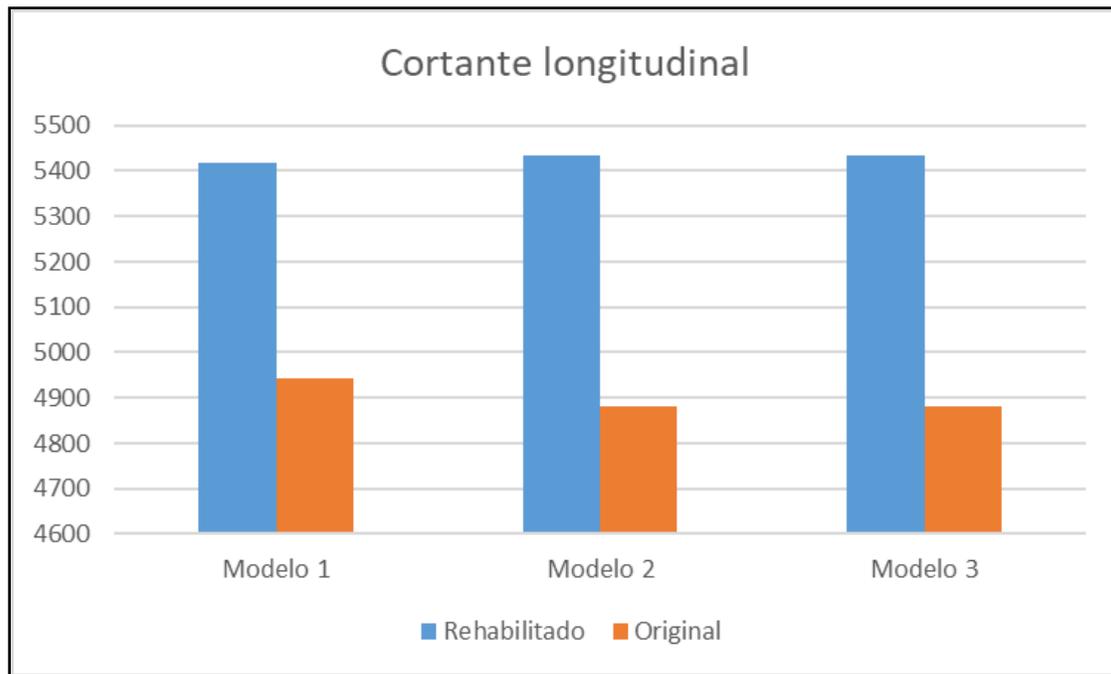


ILUSTRACIÓN 61. CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS 1, 2 Y 3 ORIGINALES Y REHABILITADOS.



En la ilustración 61 se muestran las cortantes de los modelos 1, 2 y 3 tanto originales y rehabilitados. Se puede observar que los resultados tienen un cambio muy notable entre los modelos originales y rehabilitados. Los modelos rehabilitados tienen valores de casi 10% más grandes que los originales. Los 3 modelos rehabilitados tienen una cortante de alrededor de 5400 kg.

5.2 ESPECTRO DE DISEÑO DEL 2017

Para los modelos del 10 al 15, se utilizó el espectro de diseño de las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal del año 2017 (NTC 17), el cual fue obtenido por medio del SASID.

La NTC 17 propone características con las que deben cumplir las estructuras para basarse en el espectro de diseño, por lo que se tuvo que obtener las siguientes características:

- Factor de irregularidad
- Factor de hiperestaticidad
- Clasificación de la estructura

Con las características anteriores se obtiene la Q de diseño y sobre eso se debe basar para la elección del espectro, el cual se puede observar en la ilustración 13. La Q no se modificó, se mantuvo igual.



5.2.1 PERIODO

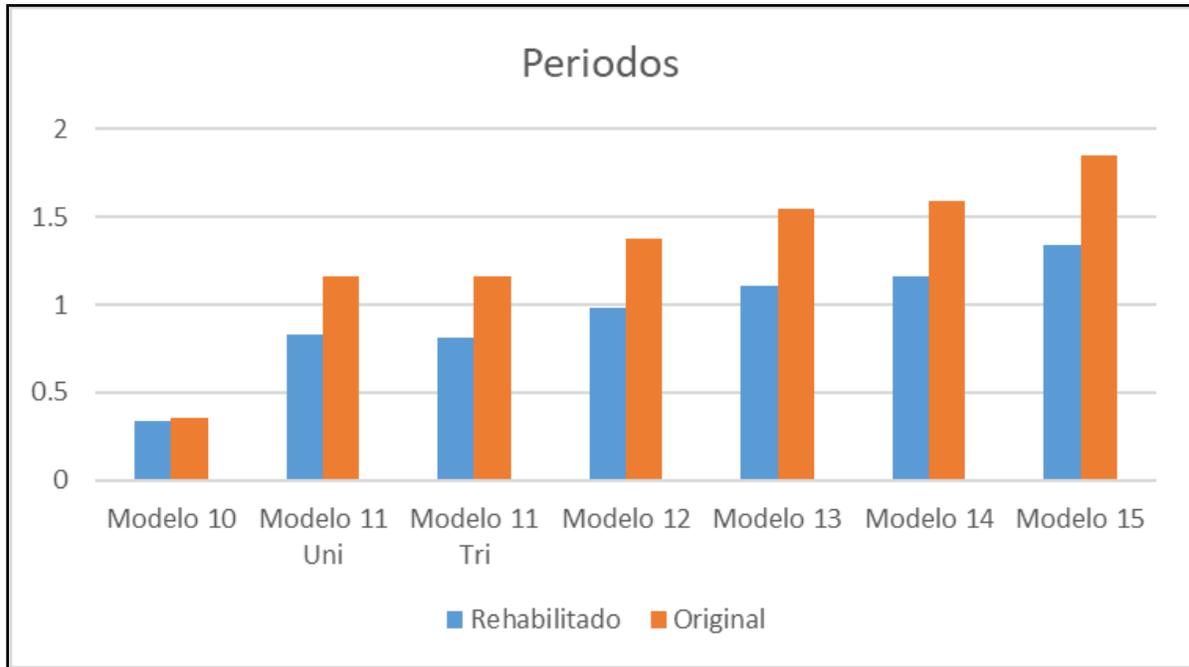


ILUSTRACIÓN 18. PERIODOS PARA MODELOS DEL 10 AL 15 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE SASID.

Como se puede observar en la ilustración anterior, se muestran los resultados de los periodos de los modelos del 10 al 15. El periodo más pequeño con menos de 0.4 s., fue del modelo 10 tanto para el original como para el rehabilitado, obtuvo el periodo más bajo debido a que a pesar de tener el mismo espectro de diseño que los demás modelos, este modelo está diseñado con placas, a diferencia de los demás que están diseñados con muros diafragma, lo que vuelve a los modelos mucho más flexibles.

El modelo 15 obtuvo el periodo más grande de todos, siendo casi 4 veces más grande que el periodo del modelo 10. Se puede observar también que los modelos originales de todos los casos, son más altos que los modelos rehabilitados.

Los modelos del 11 al 15 rehabilitados disminuyeron entre 0.5 y 0.3 segundos a comparación de los modelos originales; es decir, que los modelos rehabilitados tuvieron un mejor comportamiento en los periodos.



5.2.2 DESPLAZAMIENTOS

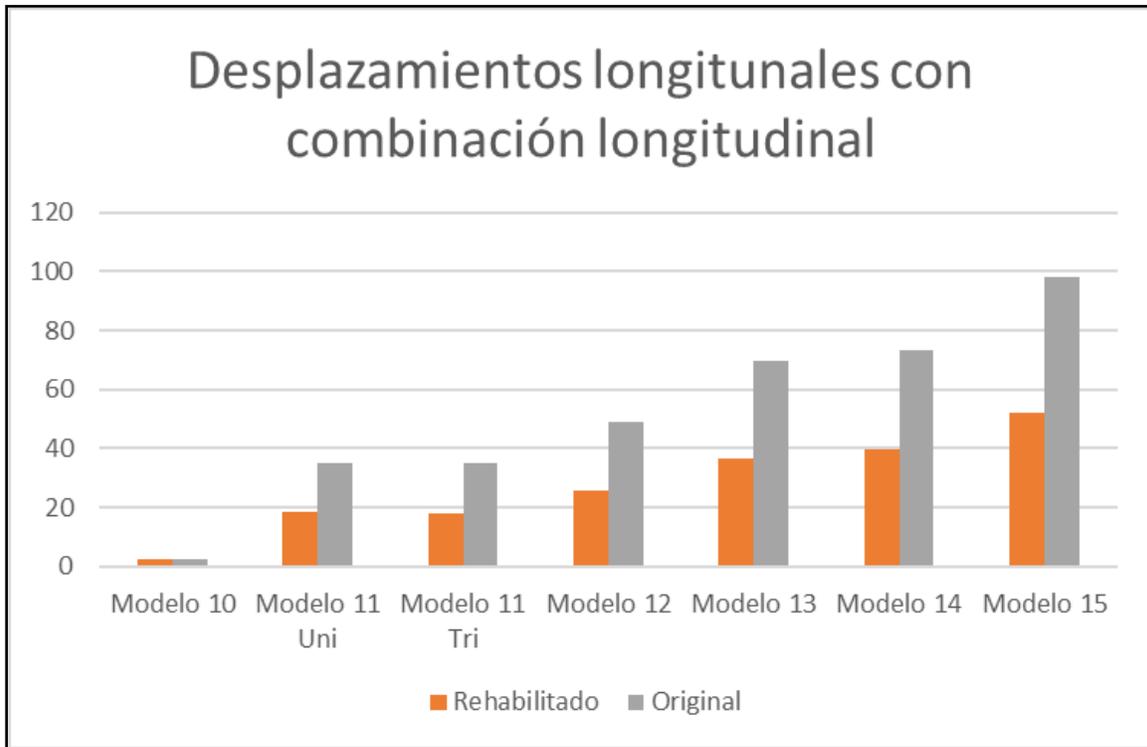


ILUSTRACIÓN 63. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS DEL 10 AL 15 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL.

En la ilustración 63 se pueden observar los resultados de los desplazamientos en dirección longitudinal con combinación longitudinal para los modelos del 10 al 15 originales y rehabilitados con espectro del SASID. Se puede observar como el modelo 10 tuvo desplazamientos menores tanto en el modelo original como en el rehabilitado y que son prácticamente iguales, recordando que los muros son diferentes a los demás modelos.

Los modelos originales tuvieron desplazamientos mayores que los modelos rehabilitados, tuvieron un crecimiento de casi el doble. El desplazamiento más grande fue del modelo 15, con casi 10 cm. de desplazamiento.



También se puede observar que a comparación de los modelos con espectro original a estos modelos con espectro de la NTC 17 los desplazamientos se incrementaron bastante, por lo que con este espectro son más inestables.

5.2.3 DISTORSIONES

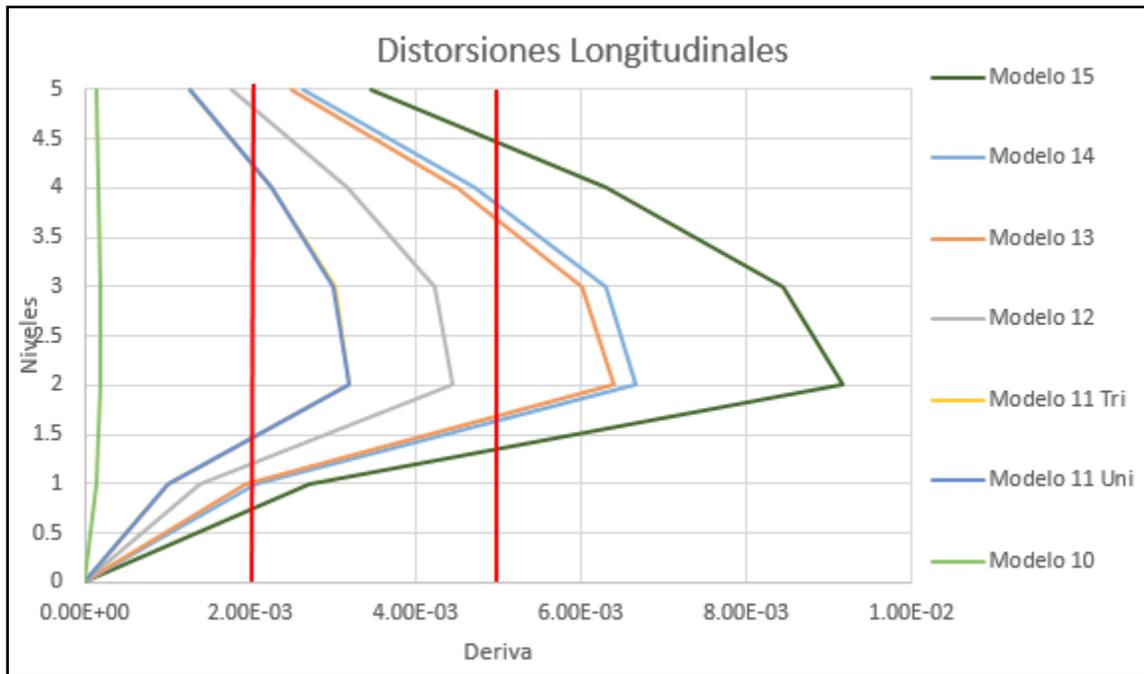


ILUSTRACIÓN 64. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 10 AL 15 ORIGINALES.

Como se puede observar en la ilustración 64, las distorsiones aumentaron con este espectro que se utilizó en estos modelos que con el espectro original.

Se puede observar que los modelos 13, 14 y 15 sobrepasaron tanto el límite de servicio como el límite de colapso y los modelos 11 con una diagonal y el 12 quedaron por debajo del límite de colapso, pero sobrepasaron el límite de servicio, por último, el modelo 10 fue el único modelo que quedó por debajo de ambos límites, debido a que este modelo se ha mostrado que es el más estable de esta sección de modelos.

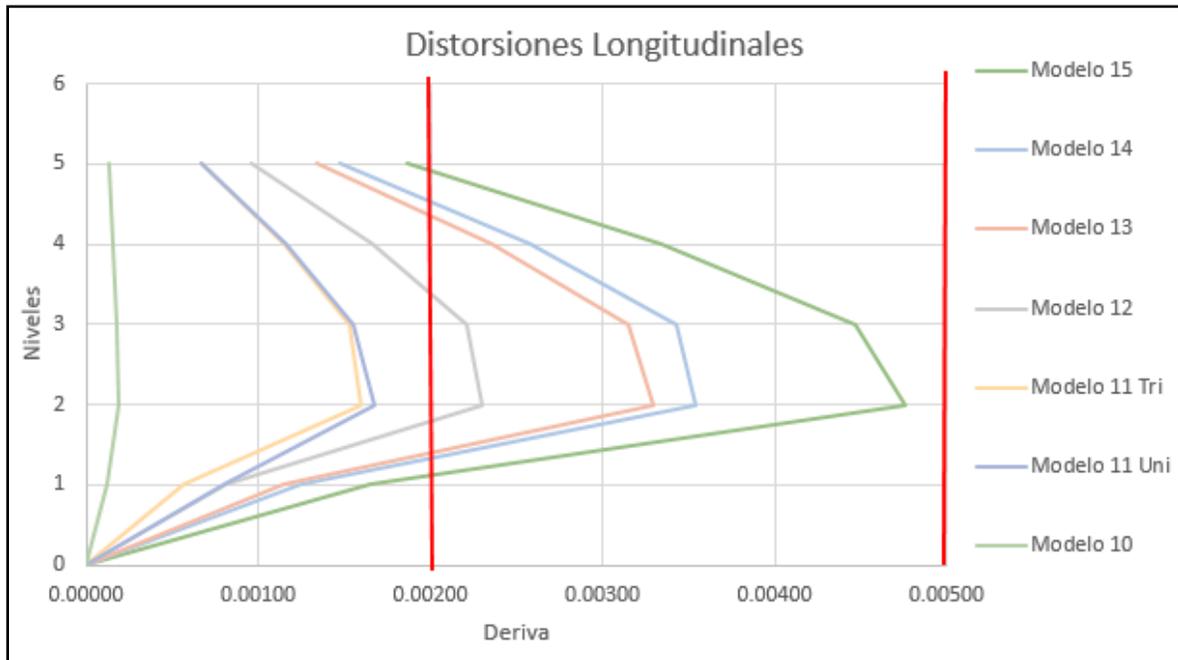


ILUSTRACIÓN 65. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS 10 AL 15 REHABILITADOS.

En las distorsiones de los modelos rehabilitados se puede observar una disminución considerable en todos los modelos. Se puede observar en la ilustración anterior que ningún modelo sobrepasó el límite de colapso. Los modelos 12, 13, 14 y 15 quedaron por debajo del límite de colapso, pero sobrepasaron el límite de servicio y los modelos faltantes quedaron por debajo de ambos límites

Las distorsiones a comparación de los modelos con espectro original crecieron, aunque se debe considerar que estos modelos que se están analizando son modelos con muros diafragma y tienen en su mayoría reducciones de inercia por lo que hace que los modelos sean más inestables y no solo se entiende que es por el cambio de espectro, sino que se deben considerar todos sus factores.



5.2.4 CORTANTE

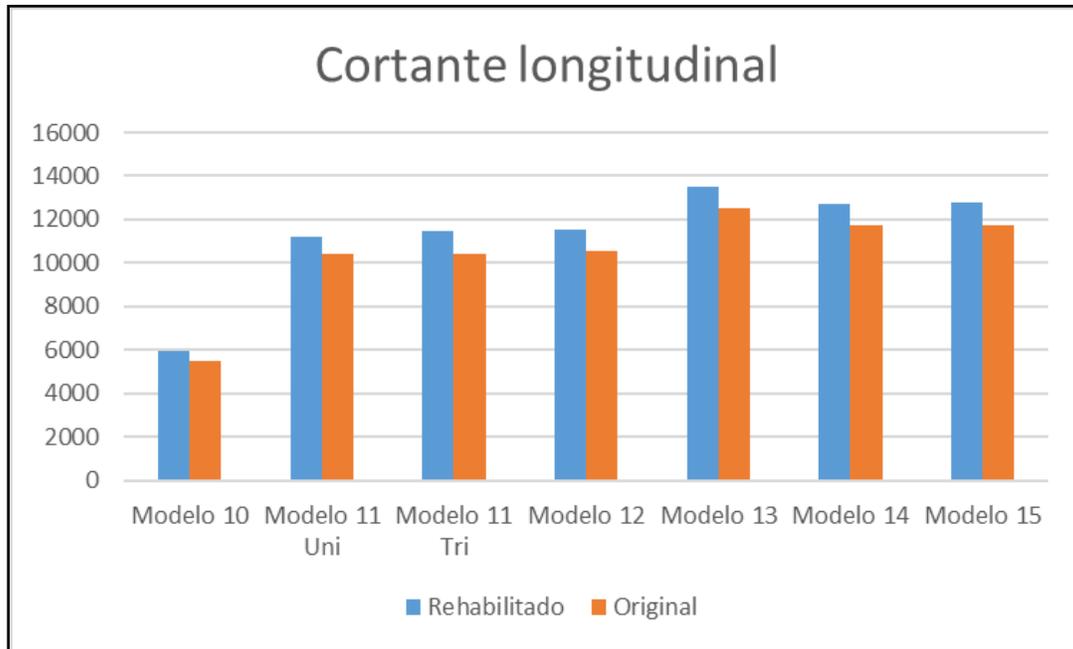


ILUSTRACIÓN 66. CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS 10 AL 15 ORIGINALES Y REHABILITADOS

En la ilustración 66 se muestran las cortantes de los modelos del 10 al 15 tanto originales y rehabilitados. Se puede observar que los resultados tienen un cambio muy notable entre los modelos originales y rehabilitados. Los modelos rehabilitados tienen valores de casi 10% más grandes que los originales. Los modelos rehabilitados tienen una cortante de entre 11000 a los 14000 kg, a excepción del modelo 10 que obtuvo el cortante más bajo con 6000 kg.

5.3 ESPECTRO DE RESPUESTA DE LA SCT 1985

En este apartado se utilizó el espectro de diseño de la SCT 1985. Para este espectro se utilizó también el software SeismoSignal y se realizó se corrigieron los valores obtenidos de la estación de la SCT y se obtuvo la gráfica de aceleración/periodo con el cual se realizaron los cálculos en



Excel para obtener el espectro. Este espectro se metió en ETABS en un bloc de notas y no se tuvo que comparar con el espectro de SASID debido a que era un solo espectro.

5.3.1 PERIODO

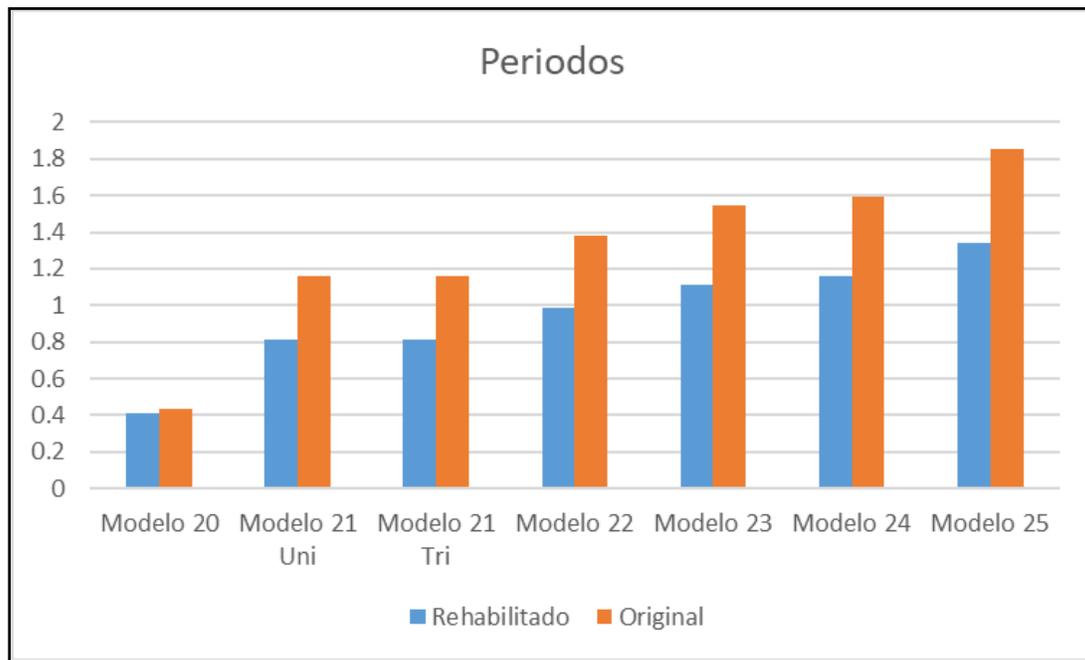


ILUSTRACIÓN 19. PERIODOS PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LA SCT 1985

Los modelos que se analizaron fueron del 20 al 25, al igual que el siguiente apartado y el anterior por lo que se podrá comparar estos tres apartados de mejor manera ya que se tratan de los mismos modelos, con las mismas especificaciones y lo único que se modificó fueron los espectros utilizados.



| Periodos | | | |
|---------------|--------------|----------|-----------------------|
| | Rehabilitado | Original | Espectro |
| Modelo 10 | 0.339 | 0.351 | NTC 2017 |
| Modelo 11 Uni | 0.833 | 1.159 | NTC 2017 |
| Modelo 11 Tri | 0.812 | 1.159 | NTC 2017 |
| Modelo 12 | 0.985 | 1.377 | NTC 2017 |
| Modelo 13 | 1.11 | 1.546 | NTC 2017 |
| Modelo 14 | 1.162 | 1.592 | NTC 2017 |
| Modelo 15 | 1.34 | 1.853 | NTC 2017 |
| Modelo 20 | 0.409 | 0.437 | Espectro registro 19S |
| Modelo 21 Uni | 0.812 | 1.159 | Espectro registro 19S |
| Modelo 21 Tri | 0.812 | 1.157 | Espectro registro 19S |
| Modelo 22 | 0.985 | 1.377 | Espectro registro 19S |
| Modelo 23 | 1.11 | 1.546 | Espectro registro 19S |
| Modelo 24 | 1.162 | 1.592 | Espectro registro 19S |
| Modelo 25 | 1.34 | 1.853 | Espectro registro 19S |
| Modelo 20 | 0.409 | 0.437 | Espectro registro SCT |
| Modelo 21 Uni | 0.812 | 1.159 | Espectro registro SCT |
| Modelo 21 Tri | 0.812 | 1.157 | Espectro registro SCT |
| Modelo 22 | 0.985 | 1.377 | Espectro registro SCT |
| Modelo 23 | 1.11 | 1.546 | Espectro registro SCT |
| Modelo 24 | 1.162 | 1.592 | Espectro registro SCT |
| Modelo 25 | 1.34 | 1.853 | Espectro registro SCT |

TABLA 7. RESULTADOS DE LOS PERIODOS ORIGINALES Y REHABILITADOS CON DIFERENTES ESPECTROS, CON ESPECIFICACIONES IGUALES

Como se puede observar en la tabla 7, los resultados de los periodos para los espectros que se muestran son iguales, debido a que tienen las mismas especificaciones en cuanto a materiales, factores de reducción en la inercia, cargas, etc., lo único que se modificó en estos modelos fueron los espectros y podemos observar que no afecta en los periodos, se mantienen igual tanto en los modelos originales como en los rehabilitados.



5.3.2 DESPLAZAMIENTOS

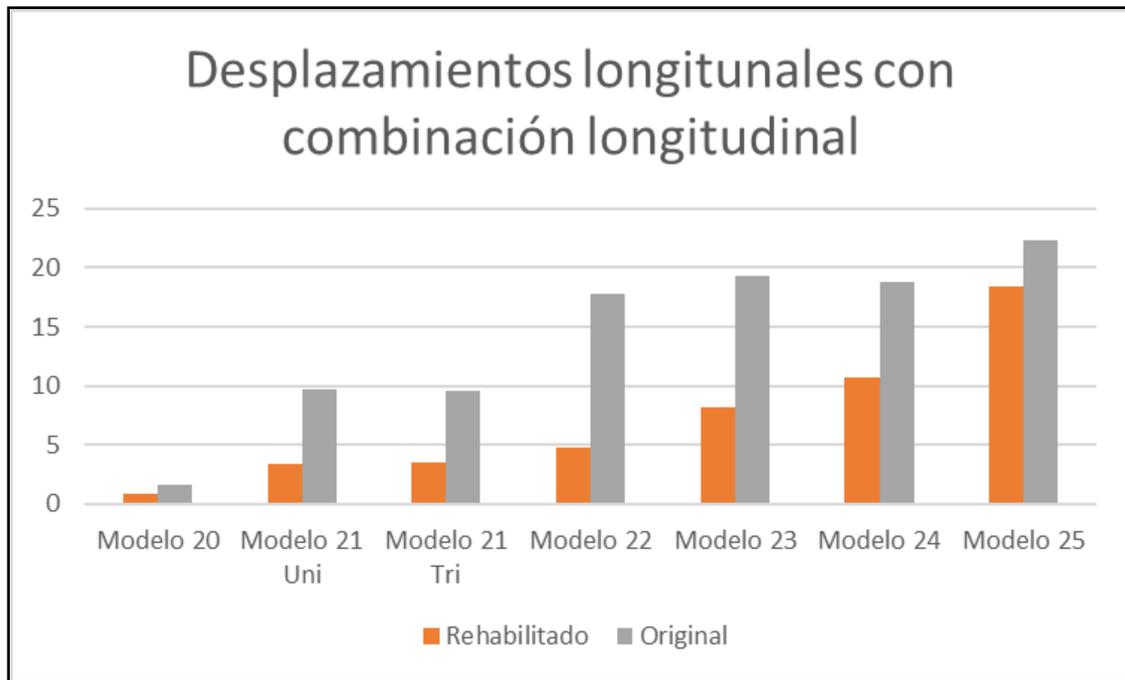


ILUSTRACIÓN 68. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON ESPECTRO DE LA SCT 1985.

Se puede observar en la ilustración 68, que el espectro de diseño de la SCT 1985 si originó un cambio en estos modelos, pues como se muestra en la gráfica anterior, los desplazamientos disminuyeron un 80 % a comparación de los modelos 10 al 15 con espectro de la NTC 17. Los modelos originales tuvieron desplazamientos mayores a los modelos rehabilitados.

Los modelos del 20 al 23 rehabilitados disminuyeron en más del 50% a comparación de los modelos originales, mientras que el modelo 23 y 25 disminuyeron un 30% y 10% respectivamente.

El desplazamiento más pequeño fue del modelo 20 con un desplazamiento de 2 mm. para el modelo rehabilitado y 3 mm. para el modelo original y el desplazamiento más grande fue del modelo 25 con 18 mm. para el modelo rehabilitado y 22 mm. para el modelo original.



5.3.3 DISTORSIONES

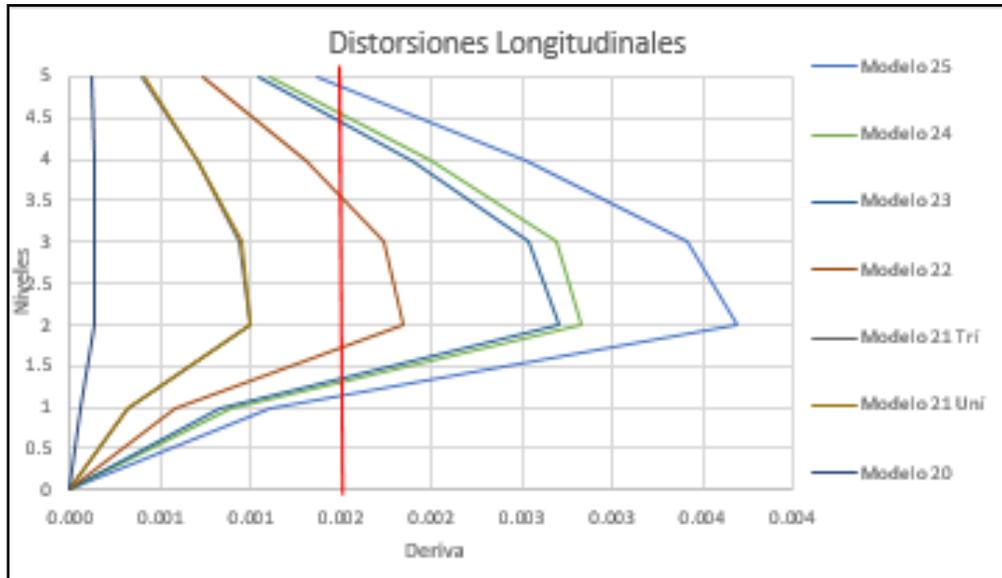


ILUSTRACIÓN 69. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES, CON ESPECTRO DE LA SCT 1985.

En la ilustración 69, se muestran las distorsiones en dirección longitudinal con combinación longitudinal de los modelos originales del 20 al 25. Es importante mencionar que la dirección y combinación que se muestran son las que obtuvieron los resultados más desfavorables.

Se puede observar como los modelos 20 y 21 con una diagonal son los más favorables, ya que quedaron por debajo de los límites de servicio y de colapso y los modelos restantes quedaron por debajo del límite de colapso, pero por encima del límite de servicio.



Por otra parte, los modelos rehabilitados obtuvieron un mejor resultado, ya que el único modelo que quedó por encima del límite de servicio fue el modelo 25 y todos los demás modelos quedaron por debajo de ambos límites establecidos por la NTC 17.

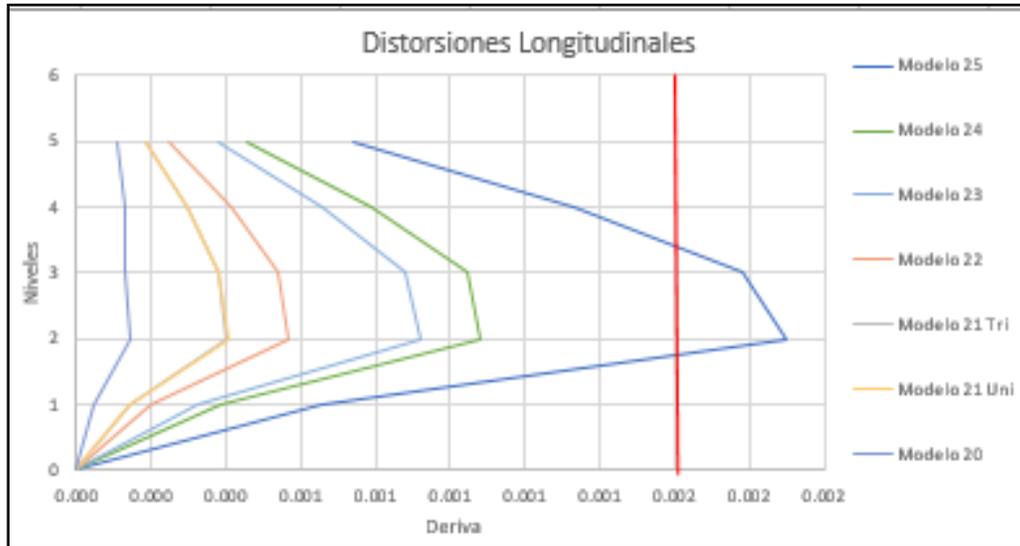


ILUSTRACIÓN 70. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 REHABILITADOS, CON ESPECTRO DE LA SCT 1985.



5.3.4 CORTANTE

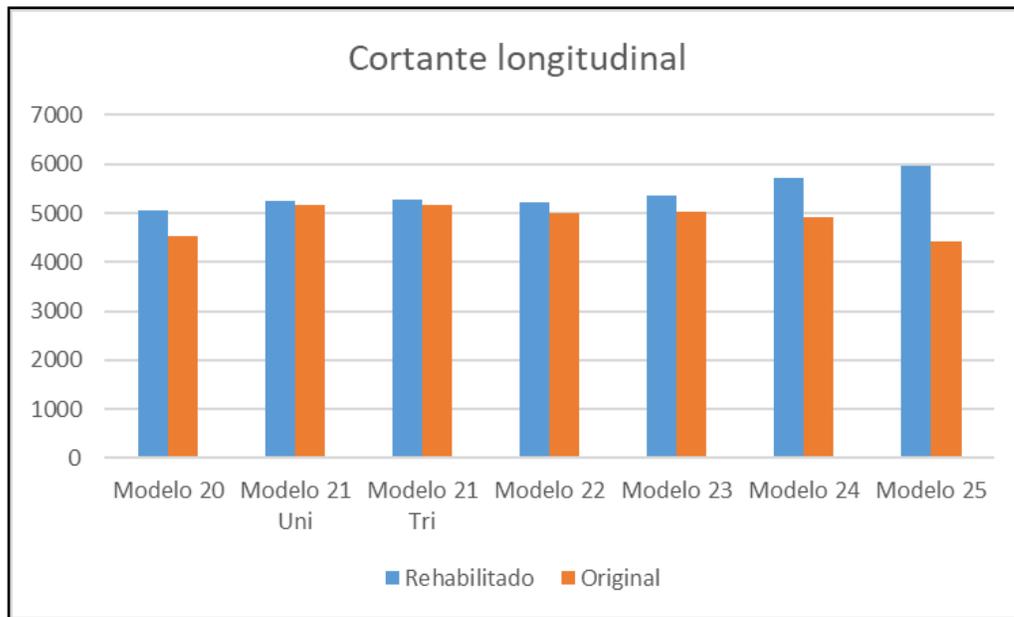


ILUSTRACIÓN 71. CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LA SCT 1985.

En la ilustración 71 se muestran las cortantes de los modelos del 20 al 25 tanto originales y rehabilitados. Se puede observar que los resultados tienen un cambio muy notable a comparación de los cortantes anteriores ya que no hay tanta diferencia entre los modelos originales y rehabilitados. Los modelos rehabilitados tienen valores de casi 10% más grandes que los originales. Los 3 modelos rehabilitados tienen una cortante de entre 3 y 10 % mayor a los modelos originales.

5.4 ESPECTRO DE RESPUESTA DE LAS ESTACIONES CERCANAS AL EDIFICIO EN 2017

Para obtener este espectro, primero se localizó el edificio en estudio, así como las estaciones más cercanas a este y se comparó con una imagen con los tipos de suelo de la CDMX, para que, de esta manera, las estaciones que se tomaran tuvieran el mismo tipo de suelo y así poder elegir la mejor.



El tipo de suelo en el que se encontraba el edificio es en la Zona IIIc , por lo que se tomaron varias estaciones cercanas y que contaran con el mismo tipo de suelo. Con ayuda del software SeismoSignal, se hicieron correcciones a las estaciones y se obtuvieron gráficas, las cuales fueron extraídas a una hoja de Excel y con algunos cálculos y comparaciones de espectros con respecto al espectro de peligro uniforme del SASID, se tomó el más similar y fue el que se utilizó para estos casos. Una vez hecho esto se realizó una gráfica con todos los espectros de respuesta de cada una de las estaciones y se graficó también el espectro del SASID que se había obtenido para los casos del 10 al 15 y se compararon los espectros contra este, de modo que el más parecido fue el que se eligió para este apartado.

5.4.1 PERIODO

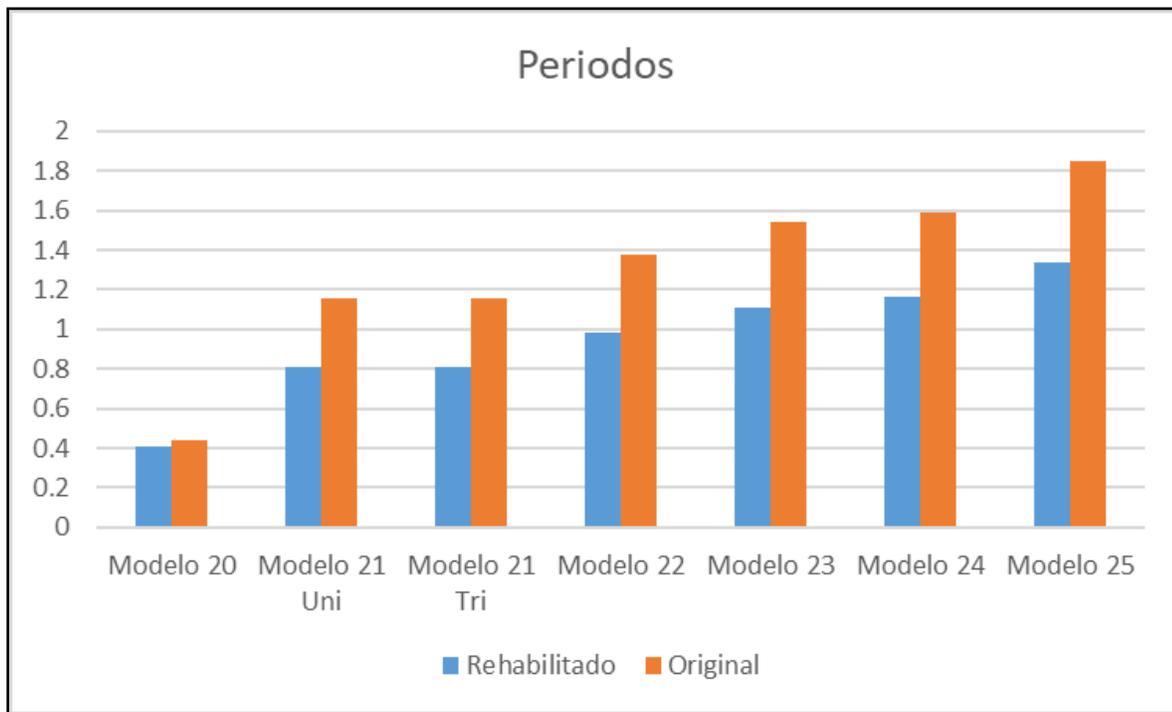


ILUSTRACIÓN 72. PERIODOS PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LAS ESTACIONES CERCANAS



Como se puede observar en la ilustración anterior, los periodos son exactamente iguales a los modelos del apartado anterior, debido a que los modelos tienen las mismas características en cuanto a factores de reducción, elementos mecánicos, cargas vivas, etc., pero con espectro distinto, pero como ya se observó, el espectro no genera algún cambio en los periodos.

5.4.2 DESPLAZAMIENTOS

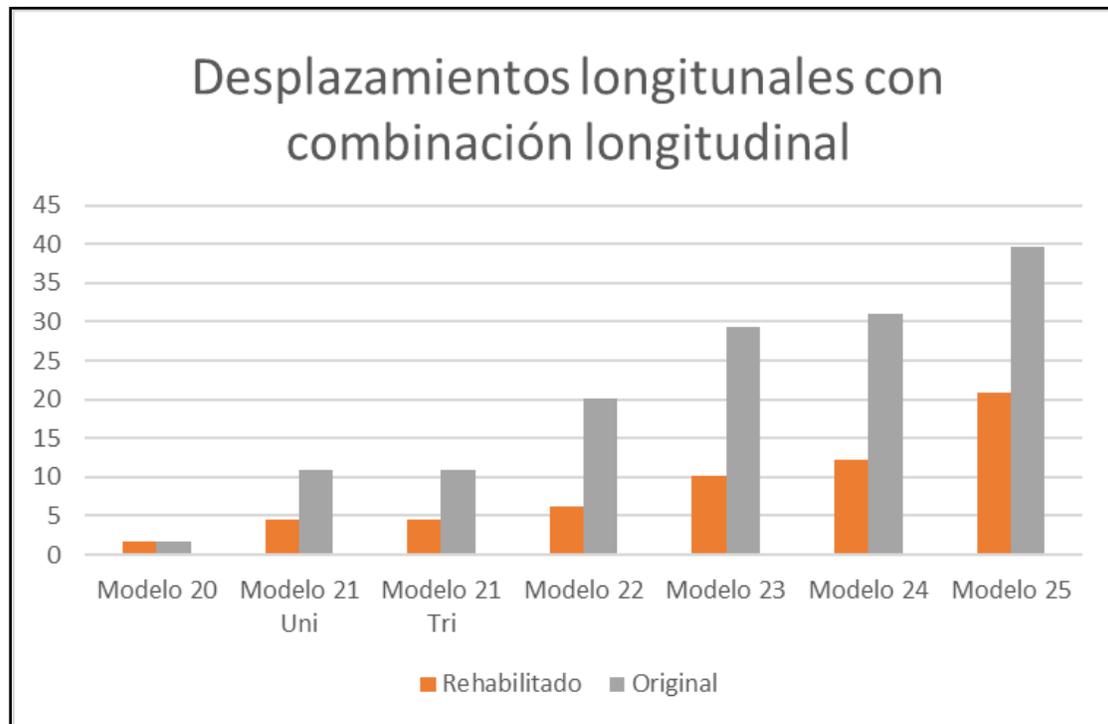


ILUSTRACIÓN 73. DESPLAZAMIENTOS PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL CON ESPECTRO DE LAS ESTACIONES CERCANAS.

En la ilustración 73 se pueden observar los desplazamientos que se obtuvieron y se puede ver cómo los modelos originales tienen desplazamientos más grandes que los modelos rehabilitados.



El modelo 20 tuvo los desplazamientos más pequeños con aproximadamente 2 mm. tanto en el modelo original como en el rehabilitado. Fue el único caso donde el modelo original y el rehabilitado tuvieron un comportamiento similar.

Los siguientes modelos fueron aumentando cada vez más debido a los muros con lo que fueron modelados y debido que se vieron afectados por los factores de reducción en la inercia.

El modelo con mayor desplazamiento fue el modelo 25 original con un desplazamiento de casi 40 mm. Los modelos rehabilitados del 21 al 25 disminuyeron de un 50 a 70% a comparación de los modelos originales.

5.4.3 DISTORSIONES

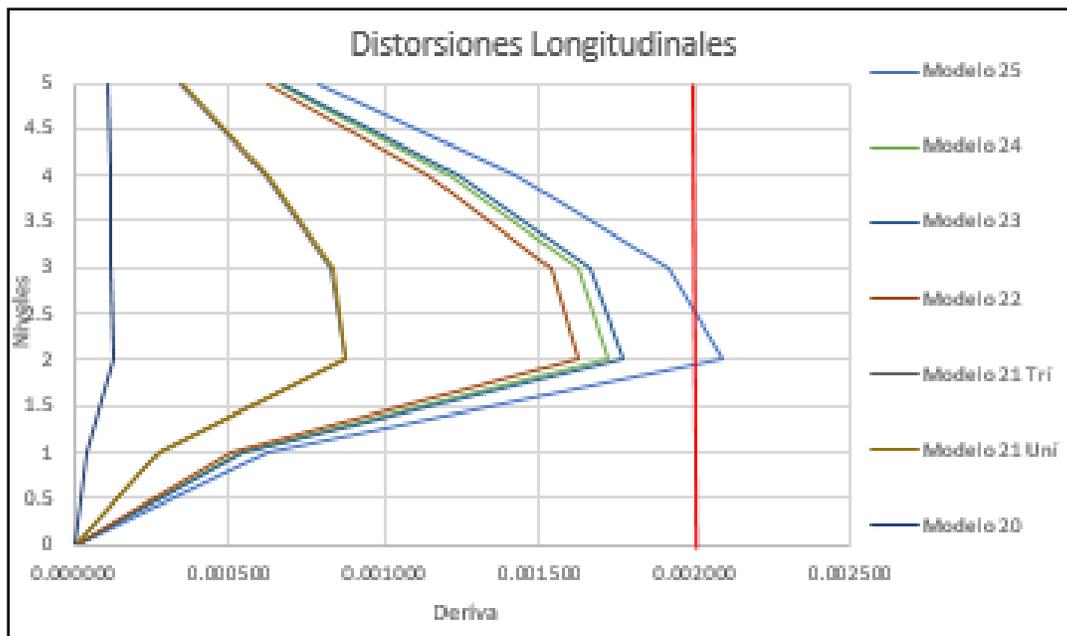


ILUSTRACIÓN 74. DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES, CON ESPECTRO DE ESTACIONES CERCANAS.

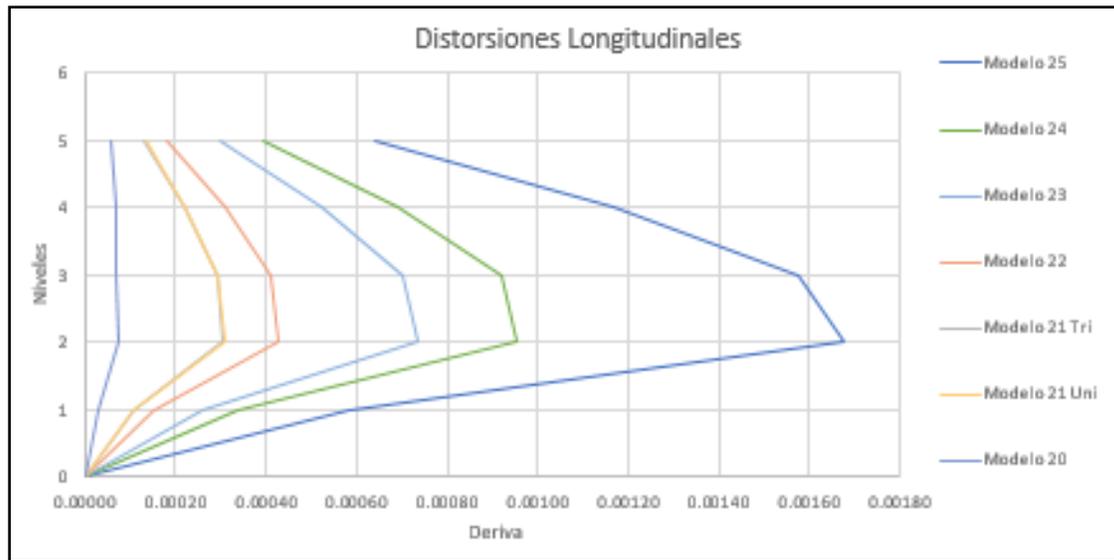


ILUSTRACIÓN 75 DISTORSIONES EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON COMBINACIÓN LONGITUDINAL PARA CASOS DEL 20 AL 25 REHABILITADOS CON ESPECTRO DE ESTACIONES CERCANAS.

En la ilustración 74 se puede observar las distorsiones de entrepiso de los modelos del 20 al 25 en dirección longitudinal con combinación longitudinal y se puede apreciar que el modelo 25 fue el único que pasó el límite de servicio, pero quedó por debajo del límite de colapso. Mientras que todos los modelos restantes quedaron por debajo ambos límites. Cabe mencionar que estos fueron los resultados de los modelos originales.

En la ilustración 75 se pueden observar los modelos rehabilitados del 20 al 25 en dirección longitudinal con combinación longitudinal y se puede apreciar que estos modelos tuvieron un mejor comportamiento en sus distorsiones, ya que ningún modelo pasó ni el límite de servicio, ni el de colapso.



5.4.4 CORTANTE

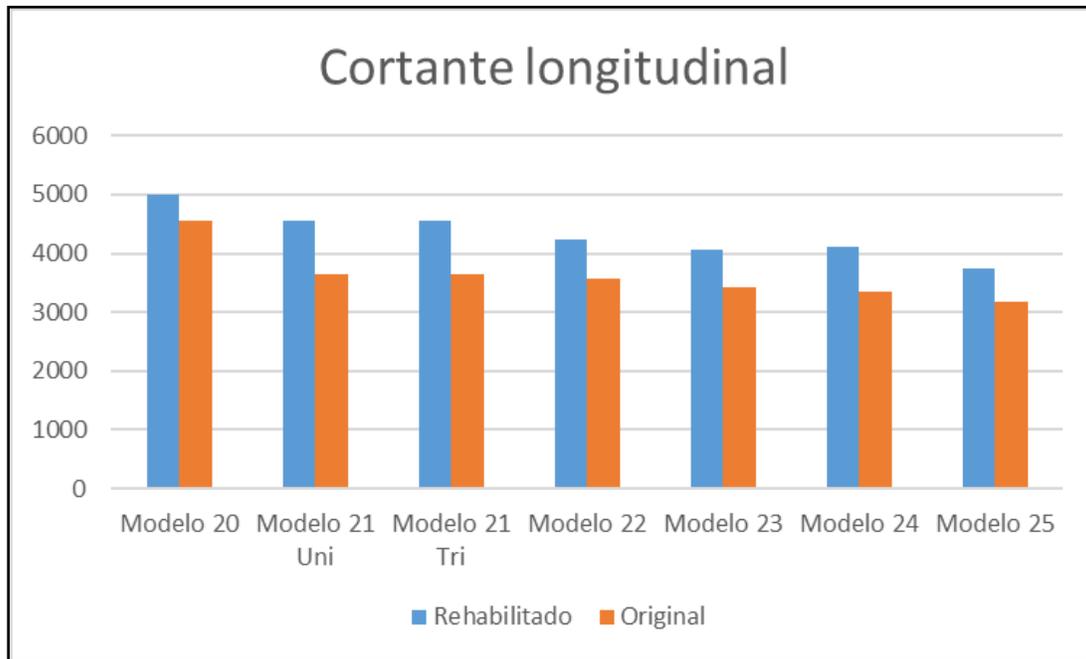


ILUSTRACIÓN 76. CORTANTE EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL PARA MODELOS DEL 20 AL 25 ORIGINALES Y REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LAS ESTACIONES CERCANAS.

En la ilustración anterior se pueden observar los cortantes longitudinales de los modelos originales y rehabilitados del 20 al 25 y podemos observar un comportamiento distinto a los demás, ya que el modelo 20 obtuvo los resultados más altos y en todos los casos anteriores había sido el menor. El modelo tuvo un resultado de 5000 kg para el rehabilitado y de 4700 kg para el modelo original.

El modelo 25 obtuvo los resultados menores con 3800 kg para el modelo rehabilitado y 3100 kg para el modelo original. Sin embargo, si tuvo el mismo comportamiento donde los modelos rehabilitados obtuvieron mayores resultados que los modelos originales.



CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 EDIFICIO ORIGINAL

Modelos con espectro de diseño original

Para los modelos 1, 2 y 3 que se modelaron con el espectro de diseño original se obtuvieron los periodos más pequeños de todos los modelos que se realizaron, con un periodo máximo de 0.437. Cabe mencionar que estos modelos no se vieron afectados por factores de reducción en su inercia y que sus muros fueron diseñados con elementos tipo placa, por lo que estos modelos fueron los más rígidos de todos. El periodo más pequeño de estos modelos fue de 0.357, con una diferencia entre el más grande y el más pequeño de 0.08 s. Estos periodos ya mencionados son los periodos del primer modo de vibrar.

Los desplazamientos fueron los más pequeños de todos, con un desplazamiento máximo de 3.12 mm. y el menor desplazamiento con 1.62 mm. Los desplazamientos no fueron tan grandes debido a que los modelos eran rígidos como ya se mencionó. Los desplazamientos fueron tomados del último nivel; es decir, del nivel 5 y fueron medidos en mm. Cabe mencionar que estos desplazamientos son el resultado en dirección longitudinal con combinación longitudinal y se mencionaron únicamente estos en el análisis de resultado debido a que fueron los más desfavorables de todos.

Los cortantes también fueron similares a los demás modelos con cortantes de 4,800 kg. Estos cortantes fueron aplicados en las columnas de la estructura y son los resultados de los cortantes longitudinales debido a que fueron los más desfavorables.

Las distorsiones para los primeros modelos con espectro de diseño original fueron pequeñas ya que quedaron por debajo de las condiciones de diseño que son marcados como límites de servicio y de colapso en las normas técnicas, los cuales no deben sobrepasarse y los primeros modelos cumplen con estas características debido a que son los modelos más rígidos del modelo original.

Modelos con espectro de diseño de 2017



Los modelos que se trabajaron con el espectro de diseño de 2017 fueron del 10 al 15. Es importante mencionar que estos modelos se modelaron con muros diafragma, a excepción del 10 que fue modelado con muros tipo placa como los primeros modelos y este tampoco se vio afectado por reducciones en su inercia. El modelo 11 se realizó dos veces ya que uno de ellos fue modelado con una sola diagonal y el otro con 3 diagonales y los modelos del 12 al 15 fueron modelados con 3 diagonales también.

Los periodos a diferencia de los primeros modelos, aumentaron, ya que al ser diseñados los modelos con diagonales se vuelven más flexibles. El periodo más bajo fue del modelo 10 ya que como ya se mencionó fue modelado muy similar a los primeros modelos y obtuvo un periodo de 0.351 s. de ahí los periodos aumentaron debido a las diagonales y el siguiente periodo; es decir, del modelo 11 con una diagonal fue de 1.159 s. por lo que aumentó más de 3 veces. El periodo más grande fue del modelo 15 con un periodo de 1.853 s. Estos periodos ya mencionados son los periodos del primer modo de vibrar.

Los desplazamientos de estos modelos fueron los desplazamientos más grandes de todos los modelos en estudio, con un desplazamiento máximo de 98.33 mm. del modelo 15 y el desplazamiento más pequeño fue para el modelo 10 con 2.417 mm. Los desplazamientos corresponden al último nivel de la estructura.

Los cortantes también fueron los resultados más grandes para estos modelos. El cortante más pequeño fue del modelo 10 con 5484.24 kg, recordando que este modelo fue modelado con muros distintos a los otros por lo que era más rígido, mientras que los otros eran más flexibles. El cortante para el modelo 11 con una diagonal fue de 10420.68 kg, el cual resultó casi el doble que el modelo 10 y por último el cortante más grande fue del modelo 12 con 12490.13 kg. Estos incrementos se deben a que estos modelos además de tener muros diafragma, se vieron afectados por reducciones en su inercia y cada modelo fue una reducción tomada de distintos reglamentos. Las diagonales concentran más la fuerza cortante en los extremos de las columnas y por ello se incrementó de manera importante el cortante con respecto a los modelos con placas. por lo que las variaciones de los resultados se deben a eso.



En la siguiente ilustración se muestran las variaciones de los periodos de los casos de análisis del edificio sobre el espectro de diseño de la NTC17. Se tomaron en cuenta solo algunos modelos para comparar casos con características de diseño distintos. Se puede apreciar que el caso 1, el cual fue modelado con muros tipo placa, sin ningún factor de reducción en la inercia tuvo un periodo de 0.43 seg., obtuvo una aceleración de 83 cm/seg², mientras que el caso 2 el cual, si se afecta por un factor de reducción en su inercia, tuvo un periodo de 0.35 seg. y una aceleración de 85 cm/seg². Para los casos 11T y 21T, que son diseñados con 3 diagonales sin reducciones en su inercia, se obtuvieron periodos de 1.159 seg., para ambos y una aceleración de 79 cm/seg², mientras que los casos 15 y 25 que, si son afectados por una reducción en la inercia, tuvieron un periodo de 1.85 seg. y la aceleración quedó igual con 79 cm/seg².

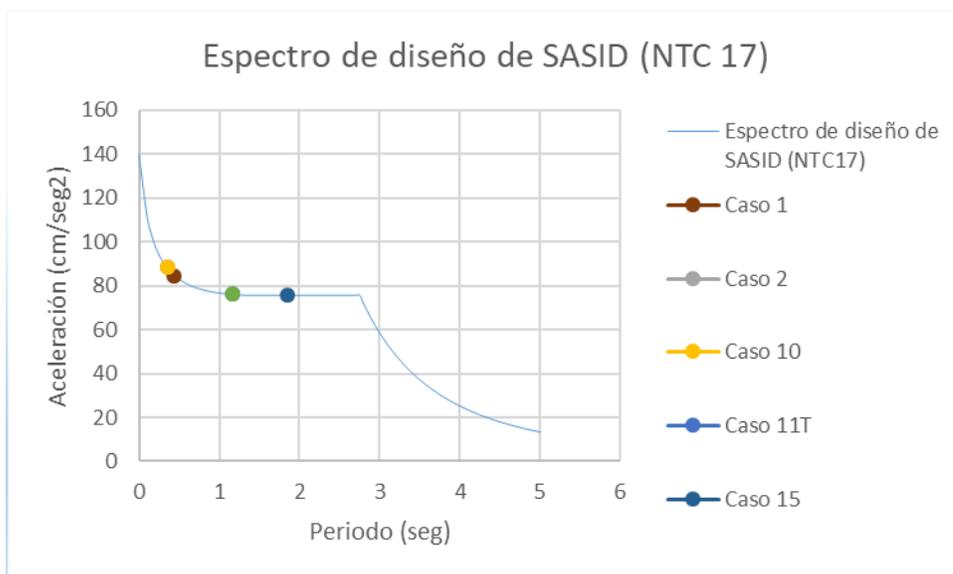


ILUSTRACIÓN 77. CASOS DE ANÁLISIS CON ESPECTRO DE LA NTC17

Espectro de respuesta de las estaciones cercanas al edificio en 2017

Estos modelos tuvieron las mismas características de los modelos con espectro de diseño de 2017, con la única modificación del espectro de respuesta. Se modelaron con los mismos agrietamientos en cada modelo, así como los muros tipo placa y muros diafragma.



Los periodos fueron similares a los modelos anteriores, solo cambió el modelo 20 con respecto al modelo 10 del que ya se mencionó anteriormente. El modelo 20 tuvo un periodo de 0.437 s en su primer modo de vibrar, el cual fue el periodo más pequeño. El periodo máximo fue de 1.853 s del modelo 25 del primer modo de vibrar.

Los desplazamientos redujeron su longitud con respecto a los anteriores. El desplazamiento mínimo fue de 1.71 mm. para el modelo 20 el cual no sufrió ningún factor de reducción y sus muros fueron modelados tipo placa, y el desplazamiento máximo fue de 39.69 mm. del modelo 25, recordando que este modelo es más flexible por las características con el que se modeló.

Estos modelos tuvieron los cortantes más pequeños de todos los casos en estudio, con un cortante mínimo de 3169.54 kg para el modelo 25 y un cortante máximo de 4544.16 para el modelo 20. Es importante destacar que estos cortantes fueron tomados de la dirección longitudinal puesto que fueron los resultados más desfavorables.

En la ilustración siguiente se muestran los periodos obtenidos de los modelos de análisis sobre el espectro de respuesta de las estaciones cercanas. Los valores obtenidos son más pequeños debido al espectro. Para el caso 1, con periodo de 0.45 seg, se obtuvo una aceleración de 26 cm/seg², para el caso 2 con un periodo de 0.35 seg, se obtuvo una aceleración de 22 cm/seg². Para los casos 11T y 21T, con periodo de 1.159 seg, se obtuvo una aceleración de 17 cm/seg² para ambos, ya que tienen las mismas especificaciones y para los modelos 15 y 25, con periodo de 1.85 seg, se obtuvo una aceleración de 26 cm/seg² para ambos.

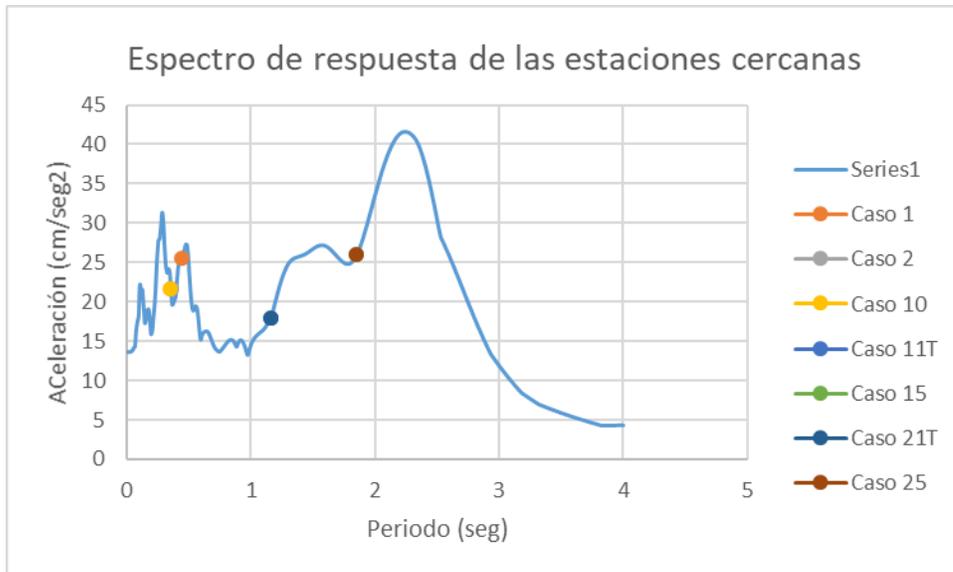


ILUSTRACIÓN 78. CASOS DE ANÁLISIS COMPARADOS CON ESPECTRO DE RESPUESTA DE LAS ESTACIONES CERCANAS.

Modelos con espectro de respuesta de la SCT 1985

Los modelos con espectro de respuesta de la SCT 1985 fueron los mismos modelos que los modelos con espectro de respuesta de las estaciones cercanas; es decir, con las mismas características de diseño como factor de reducción en su inercia, diseño de muros, cargas, etc., con el único cambio del espectro de respuesta.

Los periodos fueron los mismos que los modelos con espectro de respuesta de las estaciones cercanas, con un periodo mínimo de 0.437 s y un periodo máximo de 1.853 s. Ya que los resultados en los periodos fueron iguales, se entiende que el espectro no afecta al modo de vibrar de la estructura.

Los desplazamientos si tuvieron una variación con respecto a los demás modelos, incluso fueron los resultados más pequeños de todos los modelos, con un desplazamiento mínimo de 1.586 mm. en el modelo 20 y un desplazamiento máximo de 22.37 mm en el modelo 25, cabe mencionar que los modelos tienen las mismas características que los modelos del 10 al 15, por lo que el modelo 20 también se modeló con muros tipo placa y los otros con diagonales equivalentes, es por eso que el menor desplazamiento fue del modelo 20 por su tipo de muro y que este modelo no se afectó por ningún factor de reducción.



Los cortantes estuvieron muy similares en casi todos los modelos, basándose en una media de 4000 kg. El cortante mínimo fue de 4418.01 kg para el modelo 25 y el cortante máximo fue de 5158.83 kg para el modelo 21 con 3 diagonales. Los cortantes fueron tomados de las columnas de la estructura.

En la ilustración siguiente se muestran los periodos obtenidos de los modelos de análisis sobre el espectro de respuesta de las estaciones cercanas. Los valores obtenidos son más pequeños debido al espectro. Para el caso 1, con periodo de 0.45 seg, se obtuvo una aceleración de 15 cm/seg², para el caso 2 con un periodo de 0.35 seg, se obtuvo una aceleración de 12 cm/seg². Para los casos 11T y 21T, con periodo de 1.159 seg, se obtuvo una aceleración de 15 cm/seg² para ambos, ya que tienen las mismas especificaciones y para los modelos 15 y 25, con periodo de 1.85 seg, se obtuvo una aceleración de 28 cm/seg² para ambos.

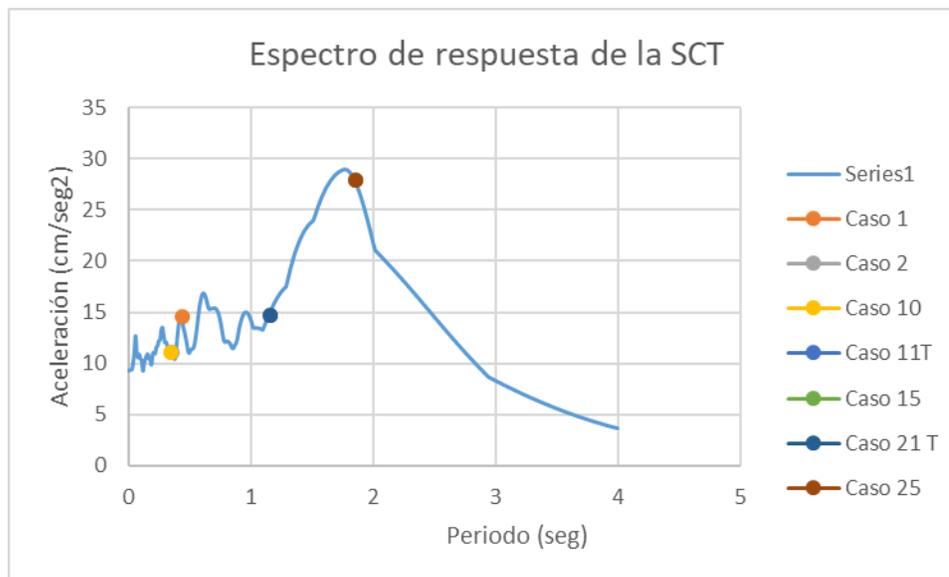


ILUSTRACIÓN 79. CASOS DE ANÁLISIS COMPARADOS CON ESPECTRO DE RESPUESTA DE LA SCT.



6.2 EDIFICIO REHABILITADO

Todos los modelos del edificio rehabilitado se modelaron con las mismas características en cuanto a factores de reducción, muros, espectros, cargas, etc. Las modificaciones se basaron en el dimensionamiento de los elementos de la estructura.

Modelos con espectro de diseño original

Para los primeros modelos con el espectro de diseño original ya conocido se obtuvieron periodos menores con respecto a la estructura original. Se obtuvo un periodo mínimo de 0.349 s en su primer modo de vibrar del modelo 2 y 3, ya que ambos tuvieron el mismo periodo y un periodo máximo de 0.408 s del modelo 1 en su primer modo de vibrar.

Los desplazamientos fueron los más pequeños de todos al igual que los modelos originales. Sin embargo, estos redujeron su desplazamiento, con un desplazamiento máximo de 2.84 mm. y un desplazamiento mínimo de 1.59 mm. Los desplazamientos no fueron tan grandes debido a que los modelos eran rígidos como ya se mencionó. Los desplazamientos fueron tomados del último nivel; es decir, del nivel 5 y fueron medidos en mm. Cabe mencionar que estos desplazamientos son el resultado en dirección longitudinal con combinación longitudinal y se mencionaron únicamente estos en el análisis de resultado debido a que fueron los más desfavorables de todos.

Los cortantes se incrementaron en los modelos rehabilitados, con respecto a los modelos originales. Estos cortantes fueron tomados en las columnas de la estructura y fueron los resultados de los cortantes longitudinales debido a que fueron los más desfavorables. El cortante máximo fue de 5433.74 kg y el cortante mínimo fue de 5416.42 kg

Modelos con espectro de diseño de 2017

Los modelos que se trabajaron con el espectro de diseño de 2017 fueron del 10 al 15. Es importante mencionar que estos modelos se modelaron con muros diafragma, a excepción del 10 que fue



modelado con muros tipo placa como los primeros modelos y este tampoco se vio afectado por reducciones en su inercia, al igual que los modelos originales.

Los periodos se redujeron a comparación de los resultados de los modelos originales. Se obtuvo un periodo mínimo de 0.339 s del modelo 10, el cual ya se explicó que su resultado tan bajo se debe a que tiene las mismas características que los primeros modelos y que sus muros son tipo placa, y el periodo máximo fue del modelo 15 con un periodo de 1.34 s en su primer modo de vibrar.

Los desplazamientos máximos se obtuvieron en estos modelos. El desplazamiento más pequeño después del modelo 10, fue del modelo 11 con 3 diagonales con un desplazamiento de 17.84 mm. en dirección longitudinal con combinación longitudinal, y el desplazamiento más grande fue del modelo 15 con 52.2 mm en la misma dirección y misma combinación.

Los cortantes máximos también se obtuvieron dentro de estos modelos y resultaron más grandes que los valores de los modelos originales. El cortante mínimo fue de 5969.87 kg para el modelo 10 y el cortante máximo fue de 13511.46 kg para el modelo 13. Estos cortantes fueron de la dirección longitudinal.

En la siguiente ilustración se muestran las variaciones de los periodos de los casos de análisis del edificio rehabilitado sobre el espectro de diseño de la NTC17. Se tomaron en cuenta solo algunos modelos para comparar casos con características de diseño distintos. Se puede apreciar que el caso 1, el cual fue modelado con muros tipo placa, sin ningún factor de reducción en la inercia tuvo un periodo de 0.40 seg., obtuvo una aceleración de 82 cm/seg², mientras que el caso 2 el cual, si se afecta por un factor de reducción en su inercia, tuvo un periodo de 0.35 seg. y una aceleración de 83 cm/seg². Para los casos 11T y 21T, que son diseñados con 3 diagonales sin reducciones en su inercia, se obtuvieron periodos de 0.812 seg., para ambos y una aceleración de 79 cm/seg², mientras que los casos 15 y 25 que, si son afectados por una reducción en la inercia, tuvieron un periodo de 1.34 seg. y la aceleración quedó igual con 79 cm/seg².

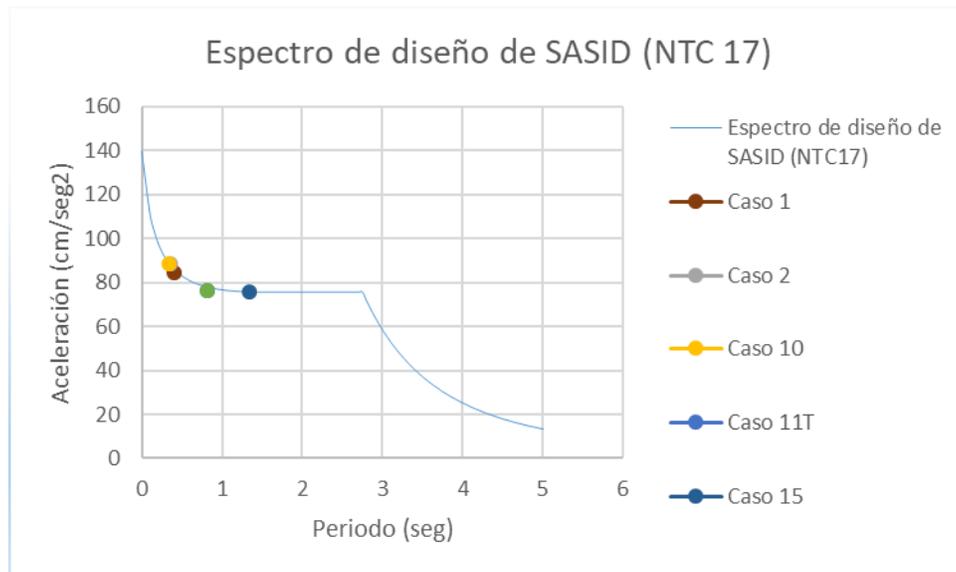


ILUSTRACIÓN 80. CASOS DE ANÁLISIS REHABILITADOS CON ESPECTRO DE LA NTC17

Espectro de respuesta de las estaciones cercanas al edificio en 2017

Estos modelos al igual que los modelos originales tuvieron las mismas características de los modelos con espectro de diseño de 2017, con la única modificación del espectro de respuesta. Se modelaron con los mismos agrietamientos en cada modelo, así como los muros tipo placa y muros diafragma.

Los periodos fueron muy similares a los periodos de los modelos del 10 al 15. El periodo más pequeño fue de 0.339 s del modelo 20 en su primer modo de vibrar y el periodo más grande fue de 1.34 s para el modelo 25 en su primer modo de vibrar.

Los desplazamientos disminuyeron considerablemente con respecto a los modelos con espectro de diseño de la NTC 17. El desplazamiento menor fue de 1.69 mm. y el desplazamiento más grande fue de 20.83 mm. estas variaciones de desplazamientos se deben a los factores de reducción, muros y el espectro utilizado.

Los cortantes fueron los más pequeños de todos los modelos rehabilitados en estudio. El cortante más pequeño fue de 3739.49 kg del modelo 25 y el cortante más grande fue de 4999.69 kg del modelo 20. Estos cortantes fueron tomados de la dirección longitudinal, debido a que fueron los más desfavorables.



En la ilustración siguiente se muestran los periodos obtenidos de los modelos de análisis sobre el espectro de respuesta de las estaciones cercanas. Los valores obtenidos son más pequeños debido al espectro. Para el caso 1, con periodo de 0.40 seg, se obtuvo una aceleración de 27 cm/seg², para el caso 2 con un periodo de 0.35 seg, se obtuvo una aceleración de 22 cm/seg². Para los casos 11T y 21T, con periodo de 0.812 seg, se obtuvo una aceleración de 15 cm/seg² para ambos, ya que tienen las mismas especificaciones y para los modelos 15 y 25, con periodo de 1.34 seg, se obtuvo una aceleración de 25 cm/seg² para ambos

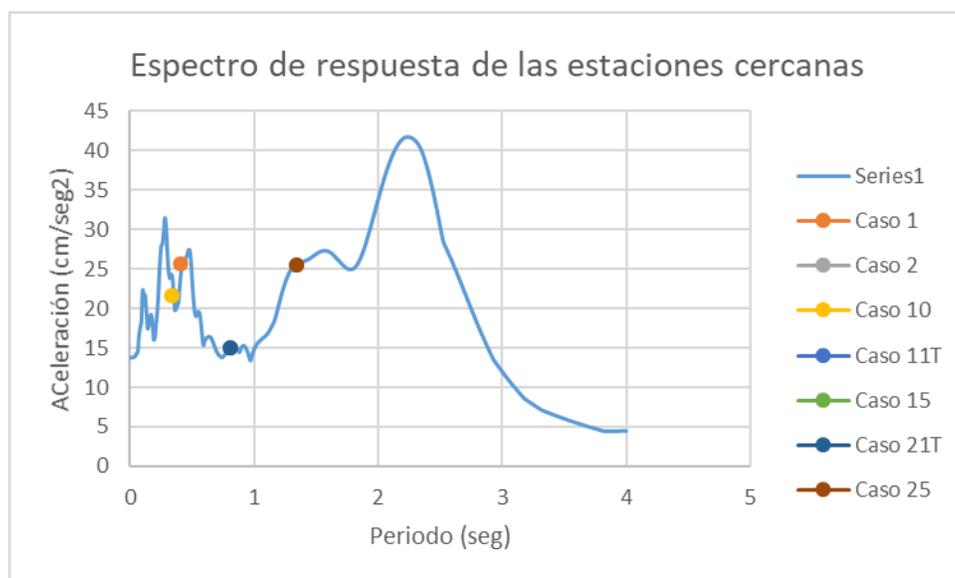


ILUSTRACIÓN 81. CASOS DE ANÁLISIS REHABILITADOS COMPARADOS CON ESPECTRO DE RESPUESTA DE LAS ESTACIONES CERCANAS.

Modelos con espectro de respuesta de la SCT 1985

Los modelos con espectro de respuesta de la SCT 1985, al igual que los modelos originales fueron los mismos modelos que los modelos con espectro de respuesta de las estaciones cercanas; es decir, con las mismas características de diseño como factor de reducción en su inercia, diseño de muros, cargas, etc., con el único cambio del espectro de respuesta.

Los periodos fueron iguales a los de los modelos anteriores, debido a las características de diseño.



Los desplazamientos de estos modelos fueron los más pequeños de todos los casos, debido al espectro de respuesta con el que se modelaron. El desplazamiento más pequeño fue de 0.85 mm del modelo 20 en dirección longitudinal con combinación longitudinal y el desplazamiento más grande fue de 18.45 mm. del modelo 25 en dirección longitudinal con combinación longitudinal también.

Por último, los cortantes fueron muy similares a los primeros modelos. El cortante mínimo fue de 5044.45 kg. del modelo 20 y el cortante máximo fue de 5964.33 kg del modelo 25. Los cortantes fueron tomados de las columnas en dirección longitudinal.

En la ilustración siguiente se muestran los periodos obtenidos de los modelos de análisis sobre el espectro de respuesta de las estaciones cercanas. Los valores obtenidos son más pequeños debido al espectro. Para el caso 1, con periodo de 0.4 seg, se obtuvo una aceleración de 15 cm/seg², para el caso 2 con un periodo de 0.35 seg, se obtuvo una aceleración de 12 cm/seg². Para los casos 11T y 21T, con periodo de 0.812 seg, se obtuvo una aceleración de 12 cm/seg² para ambos, ya que tienen las mismas especificaciones y para los modelos 15 y 25, con periodo de 1.34 seg, se obtuvo una aceleración de 20 cm/seg² para ambos.

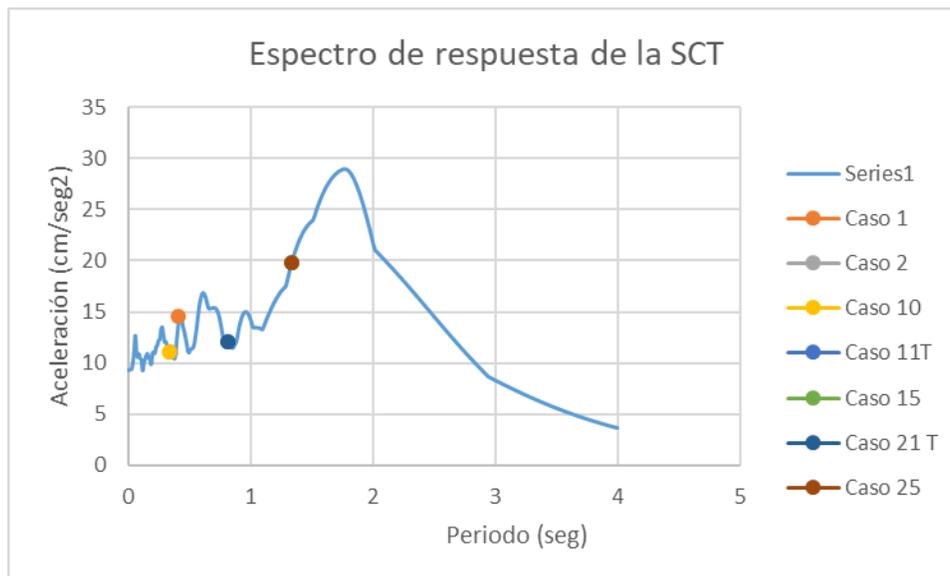


ILUSTRACIÓN 82. CASOS DE ANÁLISIS COMPARADOS CON ESPECTRO DE RESPUESTA DE LA SCT.



CONCLUSIÓN

Para concluir con la investigación es importante mencionar que los resultados se basaron en los distintos espectros que se utilizaron. Se trabajó con 4 espectros distintos:

- Espectro de diseño original
- Espectro de diseño de 2017
- Espectro de respuesta de las estaciones cercanas al edificio en 2017
- Espectro de respuesta de la SCT 1985

Para el modelo original los periodos con mejor resultado fueron los de espectro original ya que esos modelos fueron diseñados con muros tipo placa y se analizó que los espectros no influyeron en el cambio de periodos ya que los demás casos tuvieron los mismos resultados debido a que tenían las mismas condiciones de análisis a excepción del espectro, por lo que se pudo concluir que este no afecta en el resultado. Se pudo analizar también que los resultados de los modelos rehabilitados disminuyeron en un 6.64%. Sin embargo, al igual que los modelos originales, los modelos con mejor resultado, es decir; con periodos menores fueron los primeros casos con el espectro original y que los casos restantes tuvieron el mismo comportamiento debido a sus características.

En los desplazamientos se pudo analizar que los resultados más bajos se obtuvieron con el espectro de registro de la SCT, seguido del espectro de registro de las estaciones cercanas, luego los modelos con espectro original y los modelos con resultados más desfavorables fueron los que se trabajaron con el espectro de la NTC17. Estos últimos obtuvieron valores más altos en un 77.25% con respecto a los modelos con resultados más bajos con espectro de registro de la SCT. Los resultados de los modelos rehabilitados fueron más bajos que los resultados de los modelos originales en un 8.97%, sin embargo, tuvieron las mismas características que los modelos originales.

La obtención de los perfiles de distorsión para todos los modelos originales, se concluyó que los modelos no cumplieron con las distorsiones de servicio, ni las distorsiones de colapso propuestos por la norma NTC-2017, sin embargo, con el refuerzo aplicado se lograron reducir los perfiles de distorsión al punto que la mayor parte de los casos analizados cumplieron con las



condiciones de servicio propuestos por el reglamento esto se debió del incremento de la rigidez que se le dio a la estructura tras el encamisado de concreto que se le dio a las columnas y trabes. En los modelos originales la distorsión mayor se presenta en el piso 2, con el refuerzo aplicado se modificó este comportamiento, haciendo que la mayor distorsión se presente en el piso 3.

Referente a los cortantes, se observó que los mejores resultados fueron los modelos que se diseñaron con el espectro de registro de las estaciones cercanas y los resultados más desfavorables fueron los que tenían el espectro de la NTC17, con un cambio del 53.29% con respecto a los modelos con menor resultado, es decir; los que se diseñaron con el espectro de las estaciones cercanas. En el cortante se vio un comportamiento diferente con respecto a los modelos rehabilitados, ya que aumentaron en un 7.91% con respecto a los modelos originales. Este comportamiento de aumentó únicamente se dio en el cortante, debido a que los resultados dependen del empuje carga aplicada y en estos modelos se aumentó la carga por el encamisado.

Por último, se puede concluir que los modelos tanto originales como rehabilitados con espectro de la NTC17 fueron los modelos más desfavorables en todas las consideraciones anteriores. No se tuvo un espectro ideal ya que los mejores resultados estuvieron variando entre espectros.

También es importante mencionar que el rehabilitado realizado fue totalmente funcional, ya que los resultados disminuyeron aproximadamente en un 10%, por lo que fue adecuado para lo que se buscaba que era contrarrestar la inestabilidad de la estructura. El refuerzo proporcionado a la estructura fue de gran ayuda en mejorar su comportamiento, ya que los encamisados de los distintos elementos estructurales proporcionaron un incremento considerable de la resistencia del edificio, logrando cambiar su comportamiento completamente de manera positiva. Si este refuerzo no se hubiera llevado a cabo, el problema que se podría haber presentado en el sismo del 2017, el daño hubiera sido de magnitud mayor



BIBLIOGRAFÍA

- 318, A. C. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. American concrete Institute.
- 369, A. C. (2017). *Standard Requirements for Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Concrete Buildings (ACI 369.1-17) and Commentary*. American Concrete Institute.
- Cuevas, D. A. (Julio de 2016). *Ánisis sismorresistente mediante el método de análisis modal*. Obtenido de <http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1044/Diego%20Alonso%20Rodr%C3%ADguez%20Cuevas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Encamisado de concreto*. (28 de Septiembre de 2021). Obtenido de <https://www.ingegeek.site/2021/09/28/encamisado-en-concreto-armado-que-es/>
- Kaufmann, R. (2003). *Análisis estructural I*. Obtenido de <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-nacional-de-rosario/analisis-estructural-i/deformaciones-y-desplazamientos/2316572>
- Mondragón, P. B. (20 de Junio de 2012). *Ingeniería sísmica*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2012000200003
- NTC. (15 de Diciembre de 2017). Obtenido de <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/742.htm>
- NTCC-17. (2017). *NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. Gaceta oficial de la ciudad de México No.220 Bis.
- Perú, I. G. (s.f.). *Modelos numéricos*. Obtenido de <http://met.igp.gob.pe/modelos/modelos.html>
- Sismos México*. (2020). Obtenido de www.sismosmexico.org
- Vargas, M. Á. (s.f.). *ENCAMISADO EN CONCRETO ARMADO*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13328/GiraldoVargasMiguelAngel2018Anexos.pdf;jsessionid=FBEC93824969BA9E95059DDB0F5F9B27?sequence=2>