



---

---

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA  
REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS”

Tesis  
para obtener el grado de  
INGENIERO CIVIL

Presenta

ADRIÁN ÁVALOS BARRIENTOS

Asesor

DR. MANUEL JARA DÍAZ

MORELIA, MICHOACÁN

SEPTIEMBRE 2021



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



## DEDICATORIA

*“La familia es donde la vida comienza y el amor nunca termina”*

*Dedico este trabajo a mi madre: Graciela Barrientos García por su amor, su apoyo y sacrificio.*

*A mis abuelos: Alberta García Casarrubias y José Antonio Barrientos Testa † por su amor, enseñanzas y cuidados.*

*Y a toda mi familia de sangre y de vida que me ha enseñado a enfrentar las adversidades de la vida, por ustedes.*



### *AGRADECIMIENTOS*

Primeramente, agradezco a mis padres Antonio Ávalos y Graciela Barrientos por darme la vida, especialmente a mi madre por el apoyo en todos estos años de mucha lucha y sacrificio, pero también de grandes y gratificantes momentos, que me han permitido triunfar y ser una persona de bien, te amo.

A mi abuelita Alberta García por estar a mi lado en cada momento importante de mi vida y enseñarme el valor de la bondad, y a mi abuelito Antonio Barrientos quien en vida me enseñó el valor de la familia, el sacrificio y la lealtad.

A mi hermana María Fernanda por hacerme reír y compartir conmigo etapas muy importantes de mi vida y ayudarme a ser fuerte en momentos de incertidumbre.

A mis tías; Pati, Marce, Bety, Ani, mis tíos; Roberto, Mario, Pedro mis primos; Doris, Roberto, Celeste, Emilio, Aarón, Vaniah y el próximo integrante de la familia, por ser el pilar fundamental de mi vida, sacarme sonrisas en cada momento y darme el apoyo necesario para ser una persona de bien.

A mi familia Barrientos García, que ocuparía 100 hojas para nombrarlos a todos, pero que siempre hemos sido muy unidos y viven en mí, especialmente a mi tía Toña quien ya no está con nosotros, pero quien mientras vivía siempre se hacía presente en los momentos importantes, vives en nosotros.

Agradezco de manera especial a la familia que me dio la vida y a todos los amigos con los que he compartido mucho o poco tiempo, pero de quienes he aprendido cosas muy valiosas: Daniela, Kimberly, Juan, Itzamari, Alondra, Karla, Yoni, Rolando, Miguel, Azu, Tatiana, Lina, Vero, Lupita, Fani y Memo de manera especial por todo el apoyo brindado en el desarrollo de la presente tesis, sus consejos y su valiosa amistad; y sobretodo a mi equipo de vengadores que estuvieron en esta aventura, de los que he aprendido mucho y con quienes he pasado momentos malos, buenos y mejores que siempre llevaré en mi corazón Kathia, Rebeca, Cecilia, José y Alexis, mil gracias por todo.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



También agradezco a las personas que indirectamente estuvieron presentes y quienes, aunque quizás no lo sepan les tengo un cariño muy especial, Dr. Benigno, Dra. Adelina, Dr. Berrón y Nanci.

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la cual fue mi segundo hogar durante toda la carrera y me brindó las herramientas necesarias para mi desarrollo personal y profesional. Aquí aprendí valores que llevo siempre conmigo.

A la Facultad de Ingeniería Civil, que fue directamente pilar en mi formación profesional y cuyas enseñanzas dentro y fuera de las aulas vivirán siempre en mí.

Gracias a mis profesores que con su ejemplo y sus conocimientos me ayudaron a crecer intelectual y personalmente, de manera especial agradezco a la Dra. Sonia Sánchez por su visión y amistad, al Dr. Guillermo Martínez por su calidad humana y pasión al enseñar, a la Dra. Luisa Nicté por su amistad y ayudarme a ver la vida de forma relajada y sobretodo al Dr. Manuel Jara Díaz quien fue mi asesor y mentor en el desarrollo de la tesis y quien siempre me brindó su conocimiento, su respaldo, su guía y su tiempo ante cualquier duda académica, profesional o personal y por quien tengo un gran respeto y admiración.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo brindado al inicio del proyecto.

Al Club Toasmaster Valladolid, donde he recibido apoyo y mentoría importante para mi desarrollo profesional y personal, y en donde tengo amigos que aprecio mucho especialmente el Ing, Iván Esparza, mentor y amigo.

Y me agradezco a mí por permitirme pasar por este proceso, elegir esta carrera y levantarme cada día con la convicción de ser mejor persona, mejor profesional y ayudar al mundo a ser un mejor lugar.

A todas y cada una de las personas que han sido parte de una u otra forma en todo este proceso, MIL GRACIAS.



## Índice

ÍNDICE DE FIGURAS. ....	7
RESUMEN.....	10
PALABRAS CLAVE: .....	10
ABSTRACT .....	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1    OBJETIVOS GENERALES .....	14
1.2    OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
CAPÍTULO 2. SISMOS EN MÉXICO .....	16
2.1    SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985.....	16
2.2    SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017.....	17
2.3    COMPARACIÓN ENTRE LOS SISMOS DE 1985 Y 2017 .....	19
CAPÍTULO 3. TÉCNICAS DE REFUERZO .....	23
3.1    MATERIALES UTILIZADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA .....	24
3.1.1. Resinas .....	25
3.1.2. Concreto.....	25
3.1.3. Morteros y Lechadas .....	26
3.1.4. Elementos de Acero.....	26
3.2. TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN .....	27
3.2.1. Encamisado de Concreto .....	27
3.2.2. Encamisados de Acero.....	28
3.2.3. Arrostramientos de Acero .....	29
3.2.4. Arrostramientos con Cables .....	30
CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO .....	31
4.1    DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO .....	31
4.2    DESCRIPCIÓN DEL DAÑO DEL EDIFICIO DESPUÉS DEL SISMO DE 1985. ....	33



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

4.3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO UTILIZADO.....	34
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MODELO ORIGINAL.....		38
5.1	MODELOS DEL EDIFICIO ORIGINAL EN ETABS®.....	45
5.2	RESULTADOS .....	48
5.2.1	Periodos .....	48
5.2.2	Desplazamientos y distorsiones .....	50
5.2.3	Elementos Mecánicos .....	56
5.3	VARIABLES.....	60
5.3.1	Demanda sísmica .....	60
5.3.2	Diagonales Equivalentes .....	63
5.3.3	Inercia .....	68
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DEL MODELO REHABILITADO .....		73
6.1	RESULTADOS .....	73
6.1.1	Periodos .....	73
6.1.2	Desplazamientos y distorsiones .....	74
6.1.3	Elementos Mecánicos .....	77
6.2	COMPARACIÓN DE REFUERZO.....	80
6.2.1	Periodos .....	80
6.2.2	Desplazamientos y distorsiones .....	81
6.2.3	Elementos Mecánicos.....	86
6.3	CAMBIO EN EL DIÁMETRO DE LOS CABLES.....	90
6.3.1	Efecto de los cables ante variaciones en la demanda sísmica.....	95
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES .....		99
Bibliografía .....		105



## ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1.-EPICENTRO DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985, ADAPTADO DE (GÓMEZ BERNAL, JUÁREZ, & IGLESIAS). .....	17
FIGURA 2. EPICENTRO DEL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017, ( WWW.SMIG.ORG.MX, OCTUBRE 2019).....	18
FIGURA 3. TIPOS DE SUELO DE LA CD. DE MÉXICO; VERDE: ZONA I; AMARILLO: ZONA II; NARANJA: ZONA IIIA; MORADO: ZONA LLLB; ROJO: ZONA LLLC; Y GUINDA: ZONA LLLD. (SISMOS MÉXICO, 2020).....	20
FIGURA 4. ESPECTROS DE RESPUESTA EN TERRENO FIRME, ESTACIONES CU Y TACUBAYA, PARA LOS SISMOS DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 Y 2017 (D=5%), (ÁLVAREZ, 2018).....	21
FIGURA 5. ESPECTROS DE RESPUESTA EN TERRENO BLANDO, ESTACIONES SCT, PARA LOS SISMOS DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985 Y 2017 (D=5%), (ÁLVAREZ, 2018). .....	21
FIGURA 6. ENCAMISADO DE COLUMNAS Y VIGAS (AGUILAR, F. BREÑA, JARA, IGLESIAS, & PICADO, 1996). ....	28
FIGURA 7. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA EN PLANTA Y ALZADO DEL EDIFICIO EN ESTUDIO. (AGUILAR, F. BREÑA, JARA, IGLESIAS, & PICADO, 1996) .....	32
FIGURA 8. CONFIGURACIÓN DEL ARMADO DE LAS COLUMNAS. (AGUILAR, F. BREÑA, JARA, IGLESIAS, & PICADO, 1996). .....	33
FIGURA 9. ACOMODO DE LOS CABLES UTILIZADOS PARA REFORZAR EL EDIFICIO. (AGUILAR, F. BREÑA, JARA, IGLESIAS, & PICADO, 1996).....	34
FIGURA 10. VISTA DE LOS CABLES DE REFUERZO DESDE EL INTERIOR DE UNA DE LAS AULAS, SE PUEDE OBSERVAR QUE SE USAN TUBOS PARA PROTEGER LOS CABLES DE DAÑOS.....	35
FIGURA 11. VIGA DE ACERO COLOCADA PARA AYUDAR A LA CONTINUIDAD DEL EDIFICIO (AGUILAR, F. BREÑA, JARA, IGLESIAS, & PICADO, 1996).....	36
FIGURA 12. VIGA DE ACERO COLOCADA PARA REHABILITACIÓN DEL EDIFICIO .....	36
FIGURA 13. REFUERZO DE LAS COLUMNAS CON ÁNGULOS Y PLACAS DE ACERO, PARA SOPORTAR LA CARGA AXIAL ADICIONAL INDUCIDA POR LOS CABLES. (AGUILAR, F. BREÑA, JARA, IGLESIAS, & PICADO, 1996)37	37
FIGURA 14. ESPECTROS DE DISEÑO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL OBTENIDOS DEL SASID.....	39
FIGURA 15. ESPECTROS DE RESPUESTA LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL, OBTENIDOS DE LA ESTACIÓN GC38.	39
FIGURA 16. . GEOMETRÍA DE LA DIAGONAL EQUIVALENTE, (NTC,17). .....	42
FIGURA 17. ESQUEMA DEL MODELADO DE LAS 3 DIAGONALES EN LOS MODELOS. ....	42
FIGURA 18, IMAGEN DEL EDIFICIO MODELADO EN ETABS®. ....	46
FIGURA 19. GRÁFICA QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LOS PERIODOS PARA LOS DIFERENTES MODELOS. ....	48
FIGURA 20. EL CAMBIO DE LAS ACELERACIONES POR LA DIFERENCIA ENTRE PERIODOS ES MUY BAJO DE 0 % EN LA ESTACIÓN GC38 Y 14 % EN LOS ESPECTROS DEL SASID. ....	49



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



FIGURA 21. GRÁFICA DONDE SE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LOS DESPLAZAMIENTOS PROVOCADOS POR LA COMBINACIÓN TRANSVERSAL. ....	50
FIGURA 22. GRÁFICA DONDE SE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE LOS DESPLAZAMIENTOS PROVOCADOS POR LA COMBINACIÓN LONGITUDINAL. ....	51
FIGURA 23. DISTORSIONES LONGITUDINALES POR COMBINACIÓN DE CARGA TRANSVERSAL. ....	52
FIGURA 24. DISTORSIONES TRANSVERSALES POR COMBINACIÓN DE CARGA TRANSVERSAL. ....	53
FIGURA 25. DISTORSIONES LONGITUDINALES POR COMBINACIÓN LONGITUDINAL. ....	54
FIGURA 26. DISTORSIONES TRANSVERSALES POR COMBINACIÓN DE CARGA LONGITUDINAL. ....	55
FIGURA 27. GRÁFICA DE FLEXOCOMPRESIÓN, DONDE SE MUESTRA EL MOMENTO EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL CON SU COMPONENTE DE CARGA AXIAL. ....	56
FIGURA 28. GRÁFICA DE FLEXOCOMPRESIÓN DONDE SE MUESTRA EL MOMENTO EN DIRECCIÓN LONGITUDINAL CON SU COMPONENTE DE CARGA AXIAL. ....	57
FIGURA 29. GRÁFICA QUE MUESTRA LA CARGA AXIAL MÁXIMA EN CADA CASO DE ESTUDIO. ....	58
FIGURA 30. GRÁFICA QUE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DEL CORTANTE EN DIRECCIÓN TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL MÁXIMO PARA CADA CASO DE ESTUDIO. ....	59
FIGURA 31. GRÁFICAS QUE MUESTRAN LAS DISTORSIONES Y LOS DESPLAZAMIENTOS DE LOS MODELOS 1, 10 Y 20. ....	61
FIGURA 32. GRÁFICA DE CORTANTE Y MOMENTO DE LOS MODELOS 1, 10 Y 20. ....	62
FIGURA 33. GRÁFICAS QUE MUESTRAN LAS DISTORSIONES Y DESPLAZAMIENTOS DE LOS MODELOS 10, 11-A, 11-B, 20 Y 21. ....	65
FIGURA 34. MODOS DE VIBRAR DE LOS MODELOS 10, 11-A, 11-B, 20 Y 21. ....	66
FIGURA 35. GRÁFICA DE CORTANTE Y CARGA AXIAL DE LOS MODELOS 10, 11-A, 11-B, 20 Y 21. ....	67
FIGURA 36. GRÁFICOS QUE MUESTRAN LAS DISTORSIONES Y DESPLAZAMIENTOS DE LOS MODELOS 11-B, 12, 13, 14 Y 15. ....	69
FIGURA 37. PERIODOS DE LOS MODELOS 11-B, 12, 13, 14 Y 15. ....	70
FIGURA 38. GRÁFICA DE CORTANTE Y CARGA AXIAL MÁXIMA DE LOS MODELOS 11-B, 12, 13, 14 Y 15. ....	71
FIGURA 39. MODOS DE VIBRAR DE LOS MODELOS REHABILITADOS. ....	74
FIGURA 40.- DEFORMACIONES TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES PARA AMBAS COMBINACIONES DE CARGA EN LOS MODELOS REHABILITADOS. ....	75
FIGURA 41. DISTORSIONES TRANSVERSALES EN LOS MODELOS REHABILITADOS POR COMBINACIÓN DE CARGA LONGITUDINAL. ....	76
FIGURA 42. DISTORSIONES LONGITUDINALES EN LOS MODELOS REHABILITADOS POR COMBINACIÓN DE CARGA LONGITUDINAL. ....	77
FIGURA 43. CARGA AXIAL DE LOS DIFERENTES MODELOS REHABILITADOS. ....	78
FIGURA 44. CORTANTE TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DE LOS MODELOS REHABILITADOS. ....	79





## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

FIGURA 45. COMBINACIÓN DE MOMENTO Y CARGA AXIAL.....	79
FIGURA 46. COMPARACIÓN ENTRE PERIODOS DE LOS MODELOS ORIGINALES CON LOS MODELOS REHABILITADOS. ....	81
FIGURA 47. GRÁFICA QUE COMPARA LAS DISTORSIONES LONGITUDINALES DE LOS MODELOS REHABILITADOS Y LOS MODELOS ORIGINALES. ....	82
FIGURA 48. GRÁFICA QUE COMPARA LAS DISTORSIONES TRANSVERSALES DE LOS MODELOS ORIGINALES CON LOS MODELOS REHABILITADOS.....	83
FIGURA 49. COMPARACIÓN DE LAS DEFORMACIONES LONGITUDINALES MÁXIMAS ENTRE MODELOS ORIGINALES Y REHABILITADOS. ....	84
FIGURA 50. COMPARACIÓN DE LAS DEFORMACIONES TRANSVERSALES MÁXIMAS ENTRE MODELOS ORIGINALES Y REHABILITADOS. ....	85
FIGURA 51. COMPARACIÓN DE LA CARGA AXIAL MÁXIMA DE LOS MODELOS REHABILITADOS Y ORIGINALES. ..	87
FIGURA 52. COMPARACIÓN DEL CORTANTE TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL ENTRE LOS MODELOS REHABILITADOS Y ORIGINALES.....	87
FIGURA 53. COMPARACIÓN DE LA COMBINACIÓN MOMENTO LONGITUDINAL-CARGA AXIAL ENTRE MODELOS REHABILITADOS Y ORIGINALES.....	89
FIGURA 54. CAMBIOS EN LOS MODOS DE VIBRAR EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO EN LOS CABLES.....	90
FIGURA 55. VARIACIÓN DE LAS DISTORSIONES LONGITUDINALES EN LOS MODELOS 10 Y 15 CON EL CAMBIO DE DIÁMETRO EN LOS CABLES. ....	92
FIGURA 56. VARIACIÓN DE LAS DISTORSIONES TRANSVERSALES EN LOS MODELOS 10 Y 15 CON EL CAMBIO DE DIÁMETRO EN LOS CABLES. ....	92
FIGURA 57. GRÁFICA DE VARIACIÓN DE CORTANTE CON EL CAMBIO DE DIÁMETRO EN LOS CABLES.....	94
FIGURA 58. GRÁFICA DE VARIACIÓN DE MOMENTO CON EL CAMBIO DE DIÁMETRO EN LOS CABLES. ....	94
FIGURA 59. VARIACIÓN DE LA CARGA AXIAL ANTE EL CAMBIO DE DIÁMETRO EN LOS CABLES.....	95
FIGURA 60. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE CORTANTE ENTRE MODELOS ORIGINALES Y REHABILITADOS ANTE DIFERENTES DEMANDAS SÍSMICAS. ....	96
FIGURA 61. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE MOMENTO ENTRE MODELOS ORIGINALES Y REHABILITADOS ANTE DIFERENTES DEMANDAS SÍSMICAS. ....	97
FIGURA 62. VARIACIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON EL USO DE CABLES DE 4 Y 14 PULGADAS, ANTE EL INCREMENTO EN LA DEMANDA SÍSMICA. ....	98



## RESUMEN

El objetivo principal del estudio consiste en evaluar la respuesta de un edificio de concreto reforzado de baja altura, ubicado en la zona del lago de la ciudad de México, mediante el uso de cables de acero de alta resistencia postensados. Se estudia la eficiencia del sistema mediante el nivel de rigidización que puede obtenerse con los cables, el efecto de los cambios en las propiedades dinámicas, la reducción de desplazamientos y distorsiones de entrepiso. Se analiza también el incremento de las fuerzas axiales sobre las columnas y el impacto de este incremento en la ductilidad y resistencia de las columnas.

En estudios previos se observa un intervalo muy amplio de la fuerza inicial de tensado que se aplica a los cables, medida en función de su resistencia, así como del área de acero que se coloca como refuerzo. Por tal motivo, se estudia el efecto de estas variables en el comportamiento de la estructura. El impacto que tienen otras variables en la respuesta son, la inercia agrietada inicial en los elementos, la forma en que se modelan los muros de relleno y las demandas sísmicas. Estos parámetros son evaluados en los distintos modelos del edificio.

## PALABRAS CLAVE

Resiliencia; Rehabilitación; Sismos; Estructuras; Cables



## ABSTRACT

The main objective of the study is to evaluate the response of a low-rise reinforced concrete building, located in the lake area of Mexico City, through the use of post-tensioned high-strength steel cables. The efficiency of the system is studied through the level of stiffness that can be obtained with the cables, the effect of changes in dynamic properties, the reduction of displacements and interfloor distortions. The increase in axial forces on the columns and the impact of this increase on the ductility and resistance of the columns are also analyzed.

In previous studies, a very wide range of the initial tensioning force applied to the cables, measured as a function of their resistance, as well as the area of steel that is placed as reinforcement, has been observed. For this reason, the effect of these variables on the behavior of the structure is studied. The impact that other variables have on the response are, the initial cracked inertia in the elements, the way the infill walls are modeled and the seismic demands. These parameters are evaluated in the different building model.



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

México tiene una alta actividad sísmica como es bien sabido por todos, tan sólo en 2020 se presentaron 29 170 sismos de acuerdo con el servicio sismológico nacional (SSN), los eventos sísmicos son de diferentes magnitudes, algunos son apenas perceptibles, sin embargo, históricamente se han presentado eventos importantes que han generado daños materiales de alto valor económico y pérdidas humanas de valor intangible, como los eventos de 1985 y 2017 recientemente.

En muchos casos los edificios presentan colapso, o daño severo que los vuelven inhabitables, pero también suelen presentar daños leves que pueden ser fácilmente reparados o que requieren técnicas especiales de rehabilitación para volverlas seguras y que puedan utilizarse nuevamente. Cada técnica de rehabilitación tiene un comportamiento e influencia diferente sobre el edificio, por lo que es importante analizar de qué manera se comporta, con ayuda de un modelo matemático.

Este fue el caso de varios edificios que sufrieron daño durante el sismo de 1985, los cuales fueron analizados para un estudio realizado por la Universidad de Austin en Texas en conjunto con especialistas mexicanos en ingeniería; en dichos edificios se estudió su geometría, el daño sufrido por el sismo de 1985 y las técnicas de rehabilitación y reparación utilizadas, dicho estudio ayudó y fue tomado como una importante base de información para el presente análisis estructural.

Derivado del alto riesgo sísmico presente en el país, se han abierto diferentes y diversas líneas de investigación acerca del tema, entre ellos está la resiliencia sísmica la cual es la capacidad de respuesta y recuperación de la sociedad ante un evento de magnitud considerable, y el cual fue el eje principal del proyecto Resiliencia sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), en el cual se tratan temas afines al impacto de los sismos en las estructuras y que se trabaja en conjunto con otras universidades de México. A partir de este proyecto se derivan alguna líneas de investigación de las cuales



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



algunas fueron tomadas por un grupo de tesis de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, algunas de las líneas trabajadas en este grupo, están: el análisis del impacto del uso de diferentes códigos de diseño en las estructuras, el efecto de los cambios de inercia en la respuesta ante los sismos, el cambio de algunos elementos de modelación y principalmente la respuesta del edificio ante la incorporación de los diferentes elementos de refuerzo.

Para el correcto análisis de una estructura, se vuelve obligatorio el uso de modelos matemáticos realizados con un software especializado, el cual debe de contar con toda la información necesaria para que los resultados sean confiables, y llegar a conjeturas razonables. Como se sabe, los modelos son aproximaciones de la realidad, por lo que hay que saber interpretar los resultados y lo que se le ingresa al modelo.

El estudio objeto de la presente tesis, es un edificio usado para aulas y laboratorios en una universidad de la Ciudad de México, el cual fue dañado por el sismo de 1985 y reparado usando diferentes técnicas, principalmente la implementación de cables postensados en dirección longitudinal. Las consideraciones de análisis para los diferentes modelos o casos de estudio, fueron determinadas por el comité del proyecto Resiliencia Sísmica antes mencionado.

Una vez elaborados los 15 modelos diferentes con el uso del software ETABS®, se hace un análisis general del comportamiento de cada uno de los modelos, y como afecta el cambio de cada variable en los resultados obtenidos. También se hace un análisis de cada variable por separado como la inercia, el cambio de placas por diagonales y el cambio en la demanda sísmica.

Finalmente, se hacen los modelos incorporando los elementos de refuerzo como los cables, vigas de acero de continuidad y refuerzo en los muros y columnas, estos nuevos modelos se realizaron con el software SAP 2000® debido a que era más óptimo para estudiar los cables como elementos no lineales.



Se analizan los resultados obtenidos de los modelos rehabilitados de la misma manera que con los modelos originales, y se hace una comparativa entre los modelos originales y rehabilitados, para analizar el efecto del refuerzo en los mismos. En esta parte es importante hacer hincapié en el efecto propio de los cables sobre la estructura, analizar los cambios en el cambio del diámetro, cambio en el porcentaje de tensión y el efecto directo sobre los elementos mecánicos, distorsiones y periodos.

Cada uno de los puntos anteriormente mencionados se abundarán en los capítulos posteriores.

## 1.1 OBJETIVOS GENERALES

Determinar la respuesta del edificio ante diferentes variables que afectan su inercia y analizar el comportamiento de los diferentes elementos mecánicos, distorsiones, desplazamientos y propiedades dinámicas.

Ver el efecto que tiene el refuerzo en el edificio, y si genera alguna mejorar en el comportamiento general de la estructura.

Comparar variables en los cables para determinar que opción genere resultados más favorables en el diseño y desarrollo del edificio.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Utilizar los espectros del reglamento de construcción del Distrito Federal de 1966, el espectro de las normas técnicas complementarias de la Ciudad de México del 2017 (NTC 17) a través del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID) y el registro de la estación más cercana la cual fue la estación GC38 de la Ciudad de México, y analizar el efecto que las diferentes demandas sísmicas generan en la estructura.

Utilizar factores de agrietamiento de inercia propuestos por las NTC17, el ACI318 y el ACI369, y analizar cuál reglamento genera mayor impacto en el cambio de inercia y como el mismo cambio de inercia influye en el comportamiento general de la estructura.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



Modelar muros de mampostería con elementos tipo placa y con diagonales equivalentes modelados con elementos tipo link. Ya que influyen en la relación entre las deformaciones de los marcos con los muros y ver el efecto que tienen en el comportamiento de la estructura.

Revisar la eficiencia del refuerzo en el edificio, ver si los desplazamientos y las distorsiones disminuyen, así como analizar si hubo una mejora con los elementos mecánicos o un cambio en los periodos.

Observar el efecto del diámetro y fuerza de tensado inicial de los cables en la respuesta del edificio.



## CAPÍTULO 2. SISMOS EN MÉXICO

México es un país con alta actividad sísmica debido a la interacción entre 5 placas tectónicas (la de Cocos, la de Norteamérica, la de Rivera, la del Pacífico y la del Caribe), tan sólo en 2018 el Servicio Sismológico Nacional registró 15 400 sismos en el país.

Estos sismos son provocados por el contacto entre placas producto de las corrientes de convección y producen grandes fuerzas de fricción entre placas adyacentes que generan elevados esfuerzos entre los materiales, cuando los esfuerzos exceden la resistencia de la roca, o cuando se logra vencer la fuerza de fricción, se produce la ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada, generándose así un temblor que irradia dicha energía en forma de ondas que se propagan en todas direcciones.

México se encuentra en una zona conocida como cinturón de fuego del pacífico que abarca 31 países de alta actividad sísmica, lo que conlleva que históricamente se hayan presentado fuertes eventos sísmicos en el país.

### 2.1 SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985

El 19 de septiembre de 1985 ocurrió uno de los eventos sísmicos más recordados en el país por ser el más destructivo y con mayores decesos en la historia de la Ciudad de México. El sismo fue producto de la rotura del contacto entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica en las costas de Michoacán (Fig. 1) de acuerdo con el Instituto de Geofísica de la UNAM tuvo una magnitud ( $M_s$ ) de 8.1 y una duración de casi 4 minutos, el sismo fue seguido de muchas réplicas, la de mayor magnitud ocurrió 36 hr después con una magnitud ( $M_s$ ) de 7.5 que ocasionó más daños y el colapso de estructuras previamente afectadas por el evento principal. Se trata de un sismo típico de subducción o intraplaca, que se produce en la costa del Pacífico mexicano y que se caracteriza por tener un foco superficial.



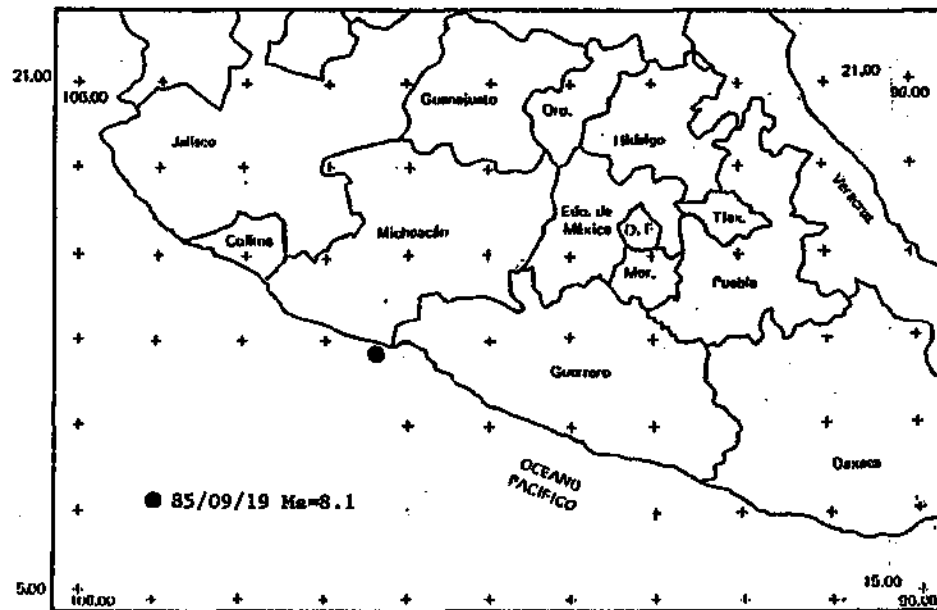


Figura 1.-Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 1985, adaptado de (Gómez Bernal, Juárez, & Iglesias).

Los daños dejados por el evento sísmico ascienden a cerca de 40 mil decesos (Sistema Sismológico Nacional), 2831 inmuebles afectados y más de 250 edificios colapsados (los edificios más dañados tenían entre 7 y 15 niveles). La Ciudad de México ubicada a 400 Km del epicentro en Lázaro Cárdenas, concentró el mayor número de daños debido a la gran densidad urbana y a la amplificación sísmica generada por el suelo lacustre de la ciudad (www.cires.org.mx, octubre 2019).

## 2.2 SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

El 19 de septiembre de 2017 tuvo lugar un sismo con una magnitud (Ms) de 7.1, a 120 km al sur de la Ciudad de México, entre los estados de Puebla y Morelos (Ver Fig. 1.2). Las coordenadas del epicentro son 18.40° latitud N y 98.72° longitud W (Ver Fig. 1.2) y la profundidad fue de 57 Km.



Figura 2. Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017, ( [www.smig.org.mx](http://www.smig.org.mx), octubre 2019).

La duración del sismo se extendió hasta 90 segundos en algunas áreas dentro de la cuenca de la Ciudad de México (CDMX).

A diferencia del sismo de 1985, este sismo fue un evento intraplaca y tuvo lugar en la placa de Cocos producto de esfuerzos tensionales a lo largo de la placa que se produce a una profundidad intermedia.

La mayor concentración de estructuras dañadas en la CDMX se dio en las zonas IIIa y IIIb, con un total de 5 765 viviendas dañadas y 44 edificaciones colapsadas. A nivel nacional se reportaron 369 decesos de los cuales 228 fueron en la CDMX y 3289 heridos. El monto de la pérdida se estima en 6 000 millones de dólares.



## 2.3 COMPARACIÓN ENTRE LOS SISMOS DE 1985 Y 2017

A pesar de que las características de los sismos de 1985 y 2017 son diferentes, ambos tuvieron grandes consecuencias, principalmente en la Ciudad de México, donde se concentró la mayor parte de las pérdidas materiales y humanas. A continuación, vamos a comparar algunas características entre ambos eventos.

El sismo de 1985 fue producido por una falla interplaca por la subducción de la placa de Cocos con la de Norteamérica, en tanto que el sismo del 2017 fue un evento intraplaca en la placa de Cocos.

El sismo de 1985 tuvo una magnitud ( $M_s$ ) de 8.1 y el de 2017 de 7.1, es decir en 1985 se liberó 32 veces más energía, sin embargo, el epicentro del sismo del 85 fue en las costas de Michoacán y Guerrero a 400 Km de la Cd. De México y el del 2017 fue entre los límites de los estados de Puebla y Morelos a 120 Km de la Cd. De México, por lo que los daños también fueron significativos.

Para entender como afectó cada sismo a la CDMX, hay que analizar el tipo de suelo de la ciudad, de acuerdo con Torres (2017) gran parte de la Cd. De México está edificada sobre grandes espesores de sedimentos blandos. Estos depósitos provocan grandes amplificaciones de las ondas sísmicas, probablemente más que en cualquier parte del mundo.

Debido a ello, los movimientos producidos por el sismo se vuelven mayores conforme se aproxime al lago y menores en las zonas firmes. En la figura 3 se muestra la distribución de los tipos de suelo en la CDMX (Sismos México, 2020)



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

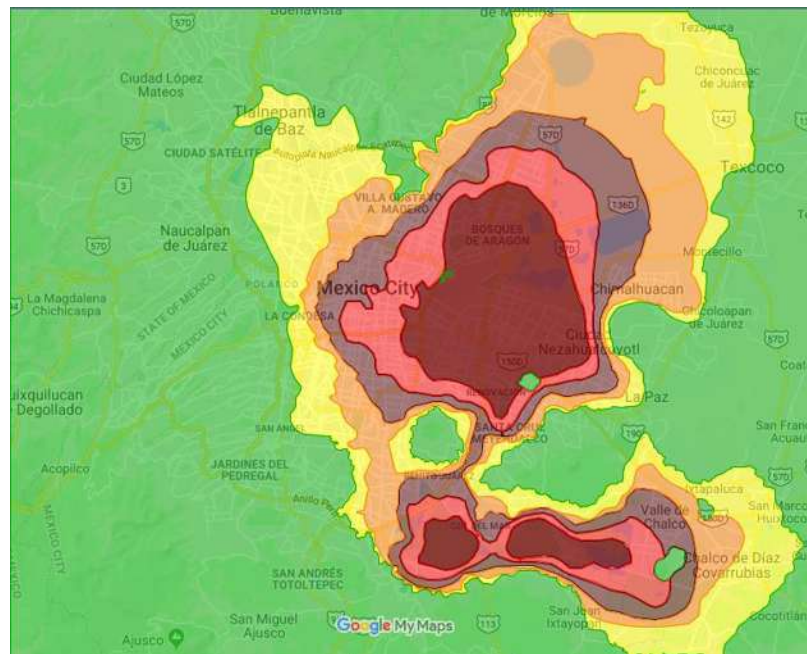


Figura 3. Tipos de suelo de la Cd. de México; Verde: Zona I; Amarillo: Zona II; Naranja: Zona IIIa; Morado: Zona IIIb; Rojo: Zona IIIc; y Guinda: Zona III d. (Sismos México, 2020).

De acuerdo con los registros de las estaciones de CU y Tacubaya ubicadas en suelo firme las aceleraciones para el sismo del 2017 fueron casi el doble que en 1985 (Fig 3), en tanto que en la estación de SCT ubicada en zona lacustre las aceleraciones fueron 40% menores en 2017 que en 1985 (Fig 4), lo que indica que el movimiento del suelo fue distinto en ambos sismos. El de 1985 era rico en frecuencias bajas (periodos altos), y el de 2017 tenía un mayor contenido de frecuencias más altas (periodos intermedios).

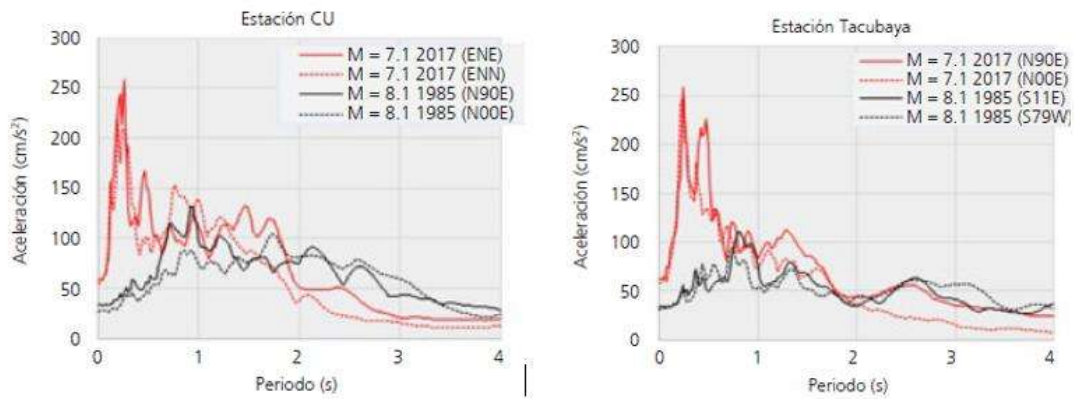


Figura 4. Espectros de respuesta en terreno firme, estaciones CU y Tacubaya, para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 ( $D=5\%$ ), (Álvarez, 2018).

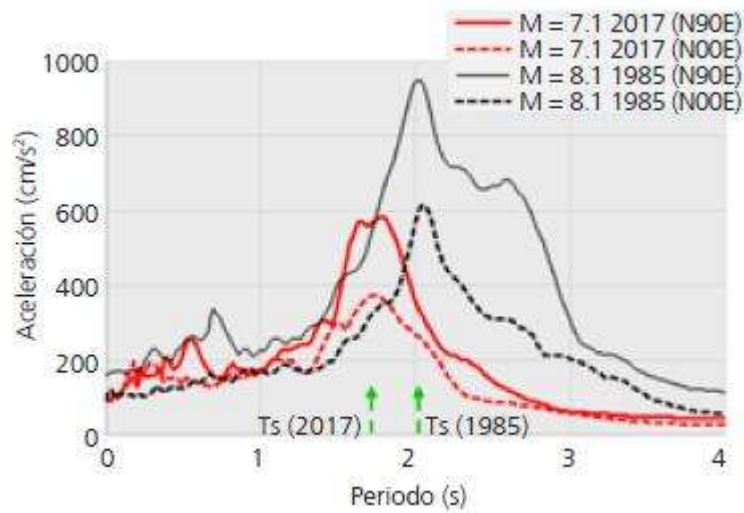


Figura 5. Espectros de respuesta en terreno blando, estaciones SCT, para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 ( $D=5\%$ ), (Álvarez, 2018).



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



Cabe mencionar que la mayor parte de los edificios cercanos a la estación SCT tienen periodos menores a 1 segundo, debido a la altura de las construcciones en la zona lo que significa que experimentaron aceleraciones muy similares en ambos eventos.

En resumen, la forma en que ambos sismos afectaron a la CDMX fue diferente, en 1985 las mayores aceleraciones se presentaron en zona lacustre o suelo blando y en 2017 las mayores aceleraciones se presentaron en suelo firme y zona de transición.

El sismo del 19 de septiembre de 1985 fue mucho más mortífero que el del 2017, de acuerdo con el sistema sismológico nacional la cifra ronda los 40 mil decesos, en tanto en 2017 se contabilizaron 369 decesos. Los daños materiales en 1985 se calculan en 8 mil millones de dólares y en 2017 en 6 000 millones de dólares (The international bank of reconstruction and development), por lo que podemos concluir que el sismo de 1985 causó mayor daño al país.





## CAPÍTULO 3. TÉCNICAS DE REFUERZO

Derivado de la peligrosidad sísmica, se han buscado y desarrollado técnicas que incrementen la capacidad de respuesta de una edificación ante eventos sísmicos. Dichas técnicas buscan disminuir los daños ocasionados por los sismos priorizando la seguridad de los usuarios, así como salvaguardar los activos socioeconómicos.

De acuerdo con Molinares Amaya (2003) “El objetivo fundamental de un diseño antisísmico es disipar una parte de la energía inducida por ellos, con el fin de mantener las aceleraciones y desplazamientos de la estructura dentro de unos límites marcados por condiciones de seguridad, servicio y confort humano.”

Antes de recurrir a técnicas de refuerzo se busca que el diseño original sea capaz de responder de manera adecuada ante las sollicitaciones sísmicas, por lo que en el diseño se buscan estructuras con peso y rigidez uniformemente distribuido, estructuras geoméricamente simétricas, uso de estructuras ligeras, con centro de gravedad lo más bajo posible, elementos estructurales que formen contornos cerrados, cimentaciones profundas apoyadas sobre capas de suelo firme, etc. No obstante, muchas edificaciones existentes no cumplen con los criterios de estructuración deseables en una zona sísmica y es necesario reforzarlas para evitar daños importantes en un evento sísmico futuro. En ocasiones la rehabilitación de las estructuras es una tarea indispensable cuando la ocurrencia de un sismo destructivo daña edificaciones y se considera factible su intervención para que pueda seguir dando servicio sin poner en riesgo a los usuarios. Para mejorar el comportamiento de las estructuras en estos casos, se implementan técnicas de refuerzo.

Las técnicas de rehabilitación y refuerzo en edificios, buscan aumentar la resistencia en estructuras rígidas, aislar la estructura de sus cimientos, disipar la energía transmitida a la estructura o incrementar la ductilidad de estructuras flexibles, es decir, de manera general busca aumentar la respuesta de la estructura ante los sismos. Algunas de estas técnicas consisten en agregar elementos externos o internos a las edificaciones, incorporación de



elementos compuestos, arrostramientos, confinamientos o la reconstrucción de elementos o partes del sistema estructural (Freyssinet, 2013).

De manera general, podemos englobar las técnicas de refuerzo en dos bloques, técnicas tradicionales y técnicas innovadoras, que hacen referencia al tiempo que llevan implementándose y a que tan habitual es su uso.

### 3.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA

Este capítulo se basará principalmente en el reporte realizado por Aguilar, et al. (1996), en el que se presenta una descripción de los materiales empleados en México en la rehabilitación de edificios después del sismo de 1985.

Las recomendaciones de los materiales utilizados para la reparación de daños en la CDMX tenían que tener las siguientes características:

1. Ser durables y proteger el refuerzo.
2. Ser estables para evitar la pérdida de contacto entre el concreto existente y el nuevo para evitar la desadherencia debido a la contracción del concreto.
3. Proveer buena adherencia entre nuevos y viejos materiales, incluidos elementos de concreto y acero.
4. Poder desarrollar buena resistencia a edades tempranas, especialmente si el elemento estructural en el que se aplica tiene que ser rehabilitado rápidamente.

Los materiales adicionalmente, deben ser compatibles y tener propiedades similares al existente para evitar sobrecargas en el material antiguo y prevenir problemas por cambios de temperatura y mala distribución de esfuerzos.





### 3.1.1. Resinas

Usadas generalmente para reparar grietas y reemplazar pequeñas cantidades de concreto dañado, así como para agregar nuevos elementos de acero y concreto debido a sus buenas propiedades de adherencia.

Se debe tener especial cuidado en la selección del tipo de resina, debido a que sus propiedades varían conforme la temperatura, ya que muchas deterioran sus propiedades por encima de los 100°C. También es importante tomar en cuenta la presencia de humedad y calor de la reacción entre la resina y el catalizador ya que puede afectar la adherencia entre los elementos.

Las cualidades que convierten a las resinas en una excelente alternativa son su excelente adherencia con el concreto, la mampostería y el acero; gran fuerza y dureza; su bajo nivel de contracción y su buena durabilidad.

### 3.1.2. Concreto

El concreto hecho en sitio, fue muy utilizado como material de reparación para reemplazar secciones dañadas, aumentar la capacidad de un elemento o para añadir elementos nuevos que ayuden a soportar cargas laterales.

Uno de los principales inconvenientes de utilizar el concreto como material de reparación fue la pérdida de contacto entre el concreto nuevo y el viejo debido a las contracciones producto del proceso de hidratación. En algunos casos esto se controla con aditivos estabilizadores de volumen.

Para ayudar a mejorar su comportamiento se recomienda preparar la superficie donde se va a colocar el concreto, generando rugosidades y saturándola.



El concreto lanzado fue usado para reparar y fortalecer muros de concreto y mampostería, y para encamisar columnas. Una de las principales ventajas de utilizar este material es la gran adherencia entre elementos, el mínimo uso de cimbras y una gran resistencia.

Uno de los principales problemas del uso de concreto lanzado es que puede tener rebote o sobre capas en la superficie lo que genera una sección irregular, lo que genera un deterioro de la durabilidad del concreto lanzado. Otro inconveniente es colocar el concreto lanzado a través de ciertas posiciones del armado del acero, aunque esto varía según la habilidad del operador.

### 3.1.3. Morteros y Lechadas

Los morteros y lechadas, son una mezcla de arena, cemento y agua, usada para reparar grietas en elementos de concreto y mampostería. Se recomienda el uso de algunos selladores, así como aditivos estabilizadores de volumen y superplastificantes para mejorar la adherencia y trabajabilidad.

Para grietas pequeñas, menores a 5 mm de ancho se pueden usar lechadas de agua y cemento, y para reparar huecos y vacíos por adherencia se recomienda el uso de una lechada de cemento-arena con un mínimo de agua. El buen trabajo de estos materiales se puede ver afectado por la habilidad del obrero y en el espacio disponible para trabajar, que garantice uniformidad y buena consolidación.

### 3.1.4. Elementos de Acero

Se usó acero de refuerzo para reemplazar varillas dañadas en elementos de concreto y se usó acero estructural para restaurar y mejorar elementos de concreto dañados. Por



ejemplo, se usaron ángulos y placas de acero para encamisar columnas y vigas. Las placas también se usaron para incrementar la capacidad a flexión de algunos elementos.

### 3.2. TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN

Las técnicas consisten principalmente en la modificación de elementos existentes o la incorporación de nuevos elementos que permitan soportar los requerimientos actuales y futuros de las edificaciones. Algunas técnicas generan cambios en las propiedades dinámicas de las estructuras por lo que fue necesario analizar estos cambios.

#### 3.2.1. Encamisado de Concreto

El encamisado de concreto se utiliza para incrementar la resistencia axial, a flexión y a cortante, de los elementos en donde se aplica. El encamisado se realiza agregando refuerzo longitudinal y transversal o una malla de acero soldada, posteriormente se incorpora concreto hecho en sitio o concreto lanzado; es importante generar rugosidad para mejorar la adherencia y un comportamiento monolítico.

Esta técnica se puede usar tanto en columnas como en vigas. Es importante garantizar la continuidad del refuerzo longitudinal para mejorar el comportamiento a flexión, cuidando no interferir con los armados que estén en la misma dirección. El concreto lanzado es la opción más viable debido a que es más rápido. En la figura 6 se puede apreciar mejor el armado de un encamisado de concreto en vigas y columnas.

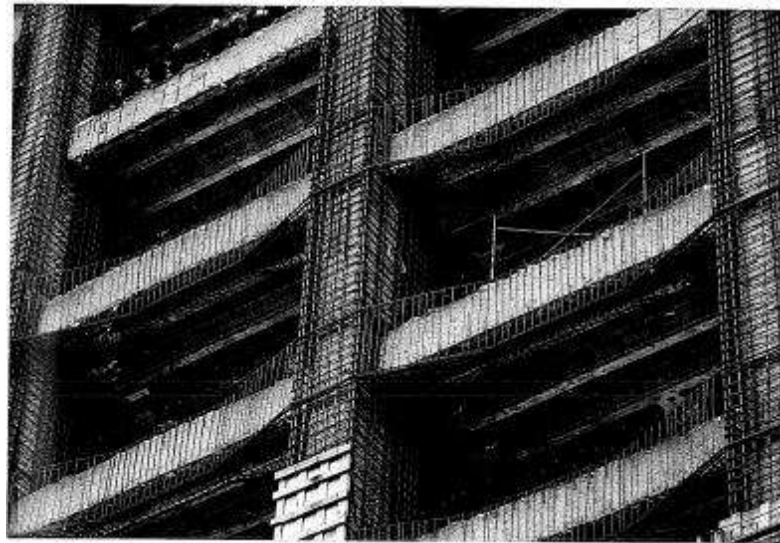


Figura 6. Encamisado de columnas y vigas (Aguilar, F. Breña, Jara, Iglesias, & Picado, 1996).

### 3.2.2. Encamisados de Acero

Algunos elementos pueden ser reparados y mejorados usando elementos de acero. Si el elemento presenta algún daño considerable como grietas o desprendimientos es importante repararlos antes de colocar los elementos de acero, en caso de no presentar daño se pueden colocar sin ninguna preparación.

En las columnas, un procedimiento común fue la incorporación de ángulos de acero en las esquinas de las columnas, estas iban soldadas a placas o barras o en algunos casos, los ángulos eran precalentados antes de soldarse para mejorar el confinamiento de los ángulos.

Debido a lo complicado que puede ser trabajar con estos elementos de acero no se genera una continuidad entre los pisos, por lo que este sistema nos ayuda a incrementar la capacidad a cortante y compresión, pero no a flexión o tensión.



Para las vigas se agregaron placas y collares para mejorar la capacidad a flexión y cortante, estos elementos se adhirieron con el uso de resinas. Otra forma en la que las vigas se reforzaron con elementos de acero, fue usando estribos post tensados, varillas en forma de U fueron usadas para confinar y agregar resistencia a cortante en las vigas, se agregaban ángulos de acero entre los estribos y las esquinas para reducir el esfuerzo generado por la tensión de los estribos. Los estribos se tensionaban con el uso de tuercas en la parte superior de la viga. Este mecanismo presentó algunos problemas después debido a que no se le daba el adecuado mantenimiento y se perdía el nivel de presfuerzo.

### 3.2.3. Arrostramientos de Acero

Son convenientes cuando tenemos limitaciones de espacio, iluminación o de peso de la estructura y los arrostramientos de acero son más fáciles y rápidos de instalar. De este sistema de refuerzo se obtuvieron buenos resultados.

De acuerdo con la Unión Europea, los arrostramientos de acero presentan las siguientes ventajas:

- Considerable incremento en la resistencia lateral.
- Agregan mínimo peso a la estructura.
- Mínima afectación a la funcionabilidad del edificio y a los usuarios.
- Mínima pérdida de espacio y de funcionalidad arquitectónica.
- Adecuado control del flujo de las fuerzas y mínima concentración local de las fuerzas.

Igualmente, la Unión Europea menciona alguna de sus principales desventajas:

- Es difícil controlar la interacción entre el acero y el concreto existente.
- No es muy eficiente en estructuras de concreto rígidas.
- Dificultad para lograr una soldadura profunda y de calidad en el sitio.



### 3.2.4. Arrostramientos con Cables

Con esta técnica se obtiene un incremento en la rigidez con respecto a la estructura original, pero hay que tener cuidado de no crear una estructura que pueda entrar en resonancia con los movimientos del suelo.

El uso de arrostramientos con cables fue usado efectivamente para mejorar estructuras escolares no dañadas de baja y media altura, las cuales tenían que ser rediseñadas para cumplir con los requerimientos de los nuevos códigos de construcción. Los cables y las estructuras tienen que interactuar para lograr una respuesta estructural aceptable.

Se debe considerar la carga axial que se genera en las columnas para evitar daños en las mismas y reforzarlas.

Existen diferentes y variadas formas de reforzar, reparar y mejorar las estructuras, es importante analizar cuál opción es óptima para cada caso. Es importante analizar el nivel de daño, el costo de reparación y la efectividad estructural de las diferentes opciones. Las técnicas utilizadas para reforzar el edificio que es tema de estudio en esta tesis, se comentan en el siguiente capítulo.



## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma Metropolitana y de la Universidad de Texas en Austin, se dieron a la tarea de recopilar información sobre las técnicas de refuerzo que fueron adoptadas en edificios dañados durante el sismo de 1985. Uno de estos inmuebles fue seleccionado para la presente tesis.

La descripción del edificio se hará de acuerdo con el reporte derivado del estudio de las dos instituciones Aguilar, et al. (1996). El edificio que será nuestro caso de estudio, es un edificio de concreto reforzado usado para salones de clases y laboratorios, ubicado en la zona sureste del lecho del lago de México, en un terreno tipo IIIb de acuerdo con la zonificación sísmica de la ciudad (Fig 3).

Su estructuración consiste en un sistema de losa plana, es decir una losa reticular que se apoya directamente sobre las columnas, sin la ayuda de vigas, de manera que no se forman marcos y se forma un sistema flexible. En la dirección corta se tiene un claro de 8.00 m y un voladizo de 3.75 m, que sirve como pasillo para el acceso a los salones de clase. En la dirección larga se tienen 2 claros de 3.50 metros en los extremos y 13 ejes de columnas separados a cada 7.20 m en la zona central (Fig.7). El edificio consta de 4 niveles de 3.0 m, conformados por una losa reticulada de concreto, apoyada sobre columnas rectangulares de concreto.

Los muros divisorios en las zonas de las escaleras y los sanitarios son de tabique arcilla sólida, en las líneas 1 y 16 se colocaron muros de concreto en el lado corto, y el resto de muros divisorios está hecho de tabique arcilla hueca. Un detalle importante a considerar en la configuración de los muros es un pequeño ventanal de 30 cm en la parte superior de los

muros que dan origen a columnas cortas en el eje posterior del edificio y que fue una de las causas de daño.

Se usó concreto con un  $f'_c$  de  $250 \text{ kg/cm}^2$  y varillas de acero de  $f_y$  de  $4200 \text{ kg/cm}^2$ , para la losa y las columnas. Las columnas están configuradas como se muestra en la figura 7.

La cimentación del edificio consta en un cajón de cimentación de aproximadamente 4.00 m de profundidad.

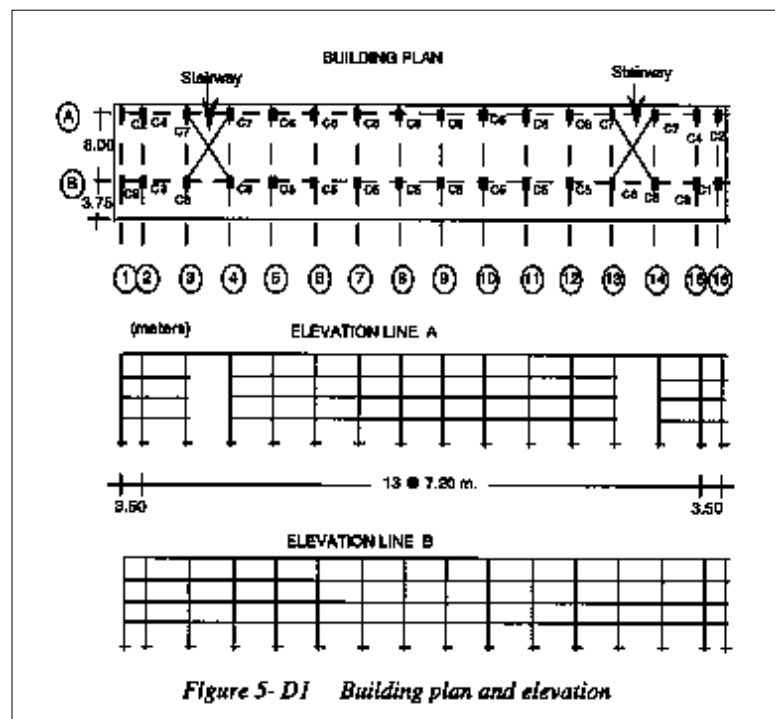


Figura 7. Configuración geométrica en planta y alzado del edificio en estudio. (Aguilar, F. Breña, Jara, Iglesias, & Picado, 1996)





## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

STORIES	FOUNDATION TO STORY 2			STORY 2 TO ROOF		
	COLUMN	SECTION cm.	MAIN BARS	HOOPS	SECTION cm.	BARS
C1	25 X 100 TYPE 1	12 # 10	2#3 @ 25	25 X 100 TYPE 2	10 # 10	1#3 @ 25 1#2.5 @ 25
C2	25 X 85 TYPE 3	8 # 10	2#3 @ 30	25 X 85 TYPE 6	4 # 10	1#3 @ 30
C3	35 X 100 TYPE 4	8 # 10	1#3 @ 25	35 X 100 TYPE 4	4 # 10 4 # 6	1#3 @ 30
C4	35 X 85 TYPE 4	8 # 10	1#3 @ 25	35 X 85 TYPE 4	4 # 10 4 # 6	1#3 @ 30
C5	35 X 100 TYPE 4	8 # 10	1#3 @ 25	35 X 100 TYPE 4	4 # 10 4 # 6	1#3 @ 30
C6	35 X 100 TYPE 4	4 # 6 4 # 10	1#3 @ 30	35 X 100 TYPE 4	4 # 10 4 # 6	1#3 @ 30
C7	35 X 100 TYPE 1	4 # 10 8 # 6	1#3 @ 30 1#2.5 @ 30	35 X 100 TYPE 3	4 # 10 4 # 6	1#3 @ 30 1#2.5 @ 30
C8	35 X 100 TYPE 1	12 # 10	2#3 @ 25	35 X 100 TYPE 3	8 # 10	1#3 @ 30
C9	25 X 100 TYPE 2	10 # 10	1#3 @ 25 1#2.5 @ 25	25 X 100 TYPE 5	6 # 10	1#3 @ 30 1#2.5 @ 30

Figura 8. Configuración del armado de las columnas. (Aguilar, F. Breña, Jara, Iglesias, & Picado, 1996).

### 4.2 DESCRIPCIÓN DEL DAÑO DEL EDIFICIO DESPUÉS DEL SISMO DE 1985.

Después del sismo de septiembre de 1985 (capítulo 2), el edificio sufrió algunos daños importantes, de acuerdo con Aguilar, et al. (1996) el arreglo de los muros perimetrales generó columnas cortas en el eje A, y se produjeron grietas mayores a 1 mm en las columnas alrededor del área de las escaleras.

Edificios con una configuración estructural similar construidos en la zona de transición cercana a la zona de las faldas del lago, sufrieron un daño menor en zonas similares de la estructura. El daño anterior mencionado, aunado a las nuevas regulaciones sísmicas en el código de la Ciudad de México para estructuras del grupo A, hizo necesaria la rehabilitación del edificio para soportar de manera adecuada las nuevas especificaciones del reglamento.

### 4.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO UTILIZADO

El procedimiento de rehabilitación, consiste principalmente en un sistema de arrostramiento de cables en la dirección longitudinal en los ejes A y B. Diferentes tipos de configuraciones de arrostramientos fueron analizadas para buscar que los arrostramientos y la estructura original alcanzaran sus resistencias al mismo nivel de desplazamiento. La configuración seleccionada se muestra en la figura 9.

Se eligieron cables de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro, post tensionados al 10% de su capacidad para prevenir una deflexión excesiva. El acero de los cables es acero de alta resistencia de  $19\ 000\text{ kg/cm}^2$ . Este procedimiento fue posible gracias a que la estructura no tiene vigas sobre las columnas y utiliza un sistema de losa reticulada, sin embargo, pasar los cables entre los nudos fue un procedimiento constructivo complicado.

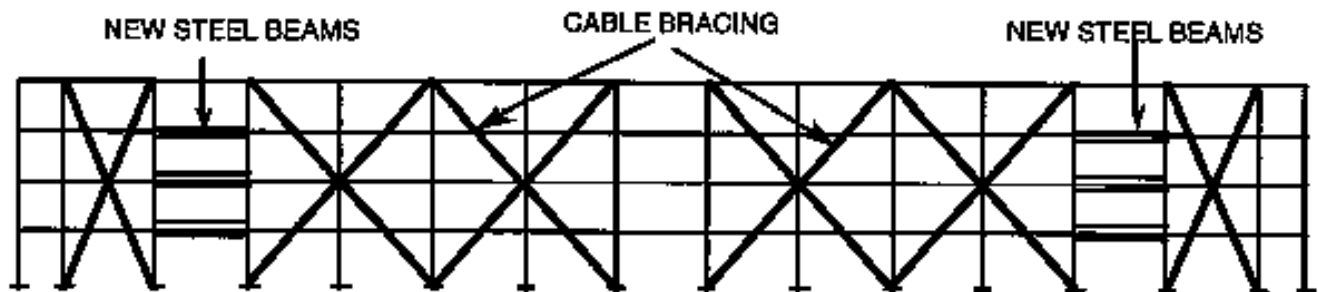


Figura 9. Acomodo de los cables utilizados para reforzar el edificio. (Aguilar, F. Breña, Jara, Iglesias, & Picado, 1996)



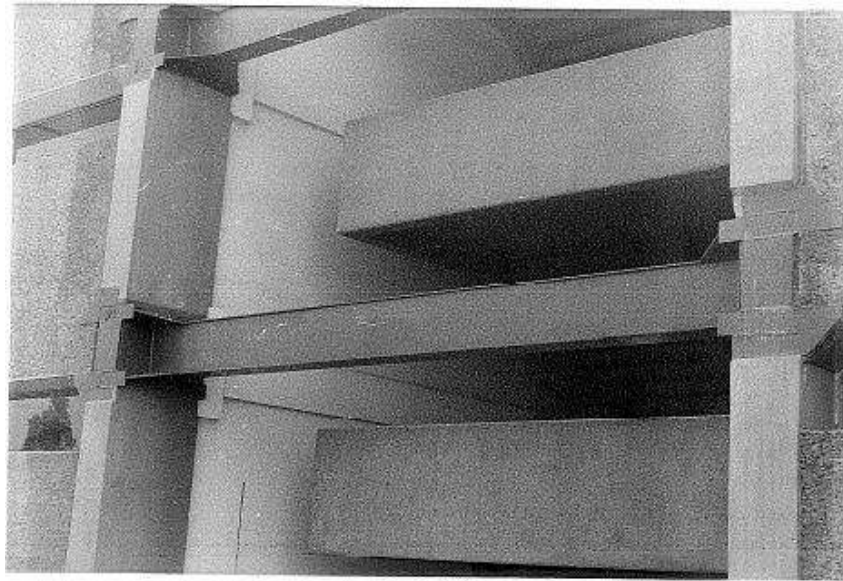
## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



*Figura 10. Vista de los cables de refuerzo desde el interior de una de las aulas, se puede observar que se usan tubos para proteger los cables de daños.*

Dado que la losa reticulada fue interrumpida en el área de las escaleras, se decidió colocar una viga de acero en cada nivel para ayudar a la continuidad, debido a que el mayor daño se concentró en las columnas del área de las escaleras, en las figuras 9 y 10 se aprecian las vigas colocadas.

Los muros de mampostería hueca en el área de las escaleras fueron reforzados con malla y concreto lanzado en ambos lados para reforzar la dirección transversal.



*Figura 11. Viga de acero colocada para ayudar a la continuidad del edificio (Aguilar, F. Breña, Jara, Iglesias, & Picado, 1996).*



*Figura 12. Viga de acero colocada para rehabilitación del edificio*

Debido a que la componente vertical de los cables induce carga axial a las columnas, estas fueron reforzadas para resistir la carga adicional. En el primer piso las columnas fueron reforzadas con ángulos de acero en las esquinas. Las columnas en los ejes 2, 3, 4, 13, 14 y 15 fueron además reforzadas en el segundo y tercer piso con ángulos y placas de acero en la dirección longitudinal de la columna (Ver Figura 11).

De acuerdo con los cálculos se espera un incremento de la rigidez del edificio, en un 80% y se espera que la resistencia del edificio aumente significativamente.

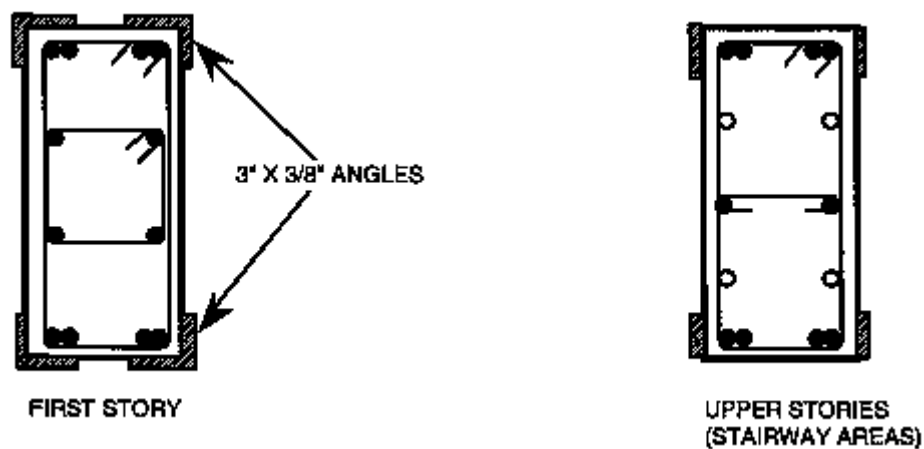


Figura 13. Refuerzo de las columnas con ángulos y placas de acero, para soportar la carga axial adicional inducida por los cables. (Aguilar, F. Breña, Jara, Iglesias, & Picado, 1996)



## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS MODELO ORIGINAL

Se hizo un análisis del edificio original, sin la rehabilitación. Dicho análisis tiene como objetivo evaluar el efecto de algunas variables propuestas en distintas normas y reglamentos, combinando cambios de inercias, de espectros de diseño y de tipos de elementos.

Se hicieron 15 modelos con ayuda del software ETABS®, a continuación, se explican las diferentes consideraciones que se utilizaron, dichos modelos fueron propuestos por el proyecto Resiliencia Sísmica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Carga viva: Para los modelos 1 a 3 se utilizó la carga viva propuesta en el Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal del año 1966 (NTC 1966), la cual es  $110 \text{ kg/m}^2$  para entepiso y  $40 \text{ kg/m}^2$  para azotea; para los modelos 10 a 15 y 20 a 25 se utilizó la carga viva que propone las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal del año 2017 (NTC 17) las cuales son  $180 \text{ kg/m}^2$  para entepiso y  $70 \text{ kg/m}^2$  para azotea.

Carga Muerta y sobrecarga: Para la carga muerta se realizó un análisis de cargas con los pesos volumétricos de las NTC 1966 y NTC 17, debido a la poca diferencia se tomó el valor más desfavorable para todos los modelos  $95 \text{ kg/m}^2$  para entrepisos y  $230 \text{ kg/m}^2$  para la azotea. En el caso de la sobrecarga, es una carga adicional que se agrega por seguridad ante algún cambio en materiales o procesos constructivos en todos los modelos fue de  $55 \text{ kg/m}^2$  para todos los pisos.

Espectro de diseño: Para los modelos 1 a 3 se utilizó el espectro propuesto en las NTC 1966 el cual tiene un valor de  $0.06 \text{ g}$ ; para los modelos 10 a 15 se utilizó el espectro de las NTC 17 (Fig.14); y para los modelos 20 a 25 se utilizaron espectros obtenidos de la estación GC 38 ubicada en el jardín de niños Luz García Campillo, debido a su cercanía con el edificio (Fig. 15).

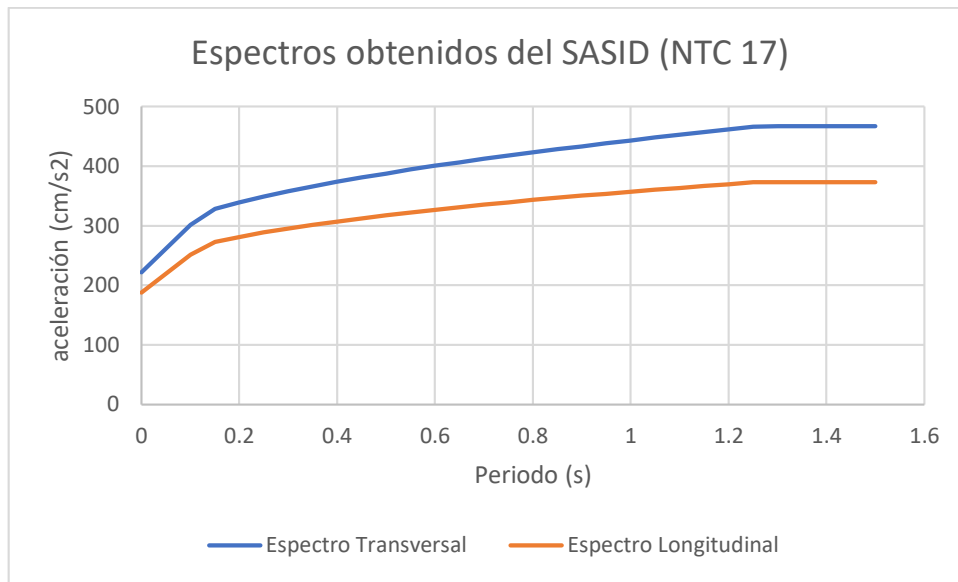


Figura 14. Espectros de diseño longitudinal y transversal obtenidos del SASID.

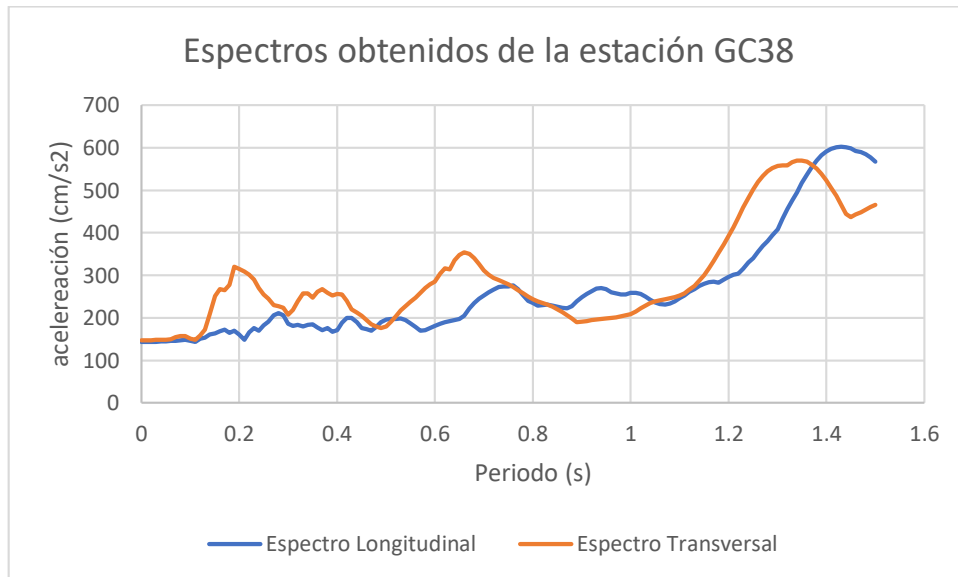


Figura 15. Espectros de respuesta longitudinal y transversal, obtenidos de la estación GC38.





## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



**Inercias:** Para el cambio de inercias se aplicaron factores de reducción en columnas, muros, vigas y losas de acuerdo a las distintas normativas; los modelos 1, 10, 11, 20 y 21 no utilizan ningún factor de reducción (Sección Bruta); los modelos 2, 3, 12, 13, 22 y 23 utilizaron los factores de agrietamiento de las NTC 17 los cuales son 0.7 para columnas y 0.5 para muros de concreto; los modelos 14 y 24 utilizan factores del código 318 del American Concrete Institute (ACI 318) los cuales son 0.7 para muros de concreto y columnas y 0.25 para losas de concreto; y los modelos 15 y 25 utilizan los factores del código 369 del American Concrete Institute (ACI 369) los cuales son 0.4 para losa, 0.5 para muros de concreto y en el caso de las columnas los valores están dados en función de la relación de la carga actuante y la carga resistente, para las columnas del nivel 1 y 2 el factor fue de 0.515, y en los niveles 3 y 4 de 0.35.

**Materiales:** Para los modelos 1,2,3,10,11,12,20,21 y 22, utilizan  $f'_c$  de 250 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de elasticidad (E) de  $10\,000\sqrt{f'_c}$  que corresponden a propiedades del proyecto; en tanto los modelos 13, 14, 15, 23, 24 y 25, se usan los valores recomendados por la guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios escolares de la Ciudad de México del año 2019 (Guía técnica 19). Para las propiedades de la mampostería, se utilizaron los valores recomendados por las NTC 17 en el caso de la arcilla par ladrillos huecos se usó un módulo de elasticidad (E) de 1 200 kg/cm<sup>2</sup>, un  $f'_m$  de 20 kg/cm<sup>2</sup> y un peso volumétrico de 1 700 kg/m<sup>3</sup> y en el caso de la arcilla para ladrillos sólidos se utilizó un módulo de elasticidad (E) de 9 000 kg/cm<sup>2</sup>, un  $f'_m$  de 15 kg/cm<sup>2</sup> y un peso volumétrico de 1 300 kg/m<sup>3</sup>.

**Tipos de elemento:** En todos los modelos, las columnas y vigas se modelan como elementos tipo barra; en tanto las losas, pretilas y muros de concreto se modelan como elementos tipo placa; para el caso de los muros de mampostería en los modelos 1,2,3 10 y 20 se modelan como elementos tipo placa y en el resto de modelos se modela como diagonales equivalentes usando elementos tipo link, el proceso de cálculo se basa en las NTC 17 y se describe a continuación.





## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



El uso de las diagonales sirve para sustituir el modelado de muros como placa, por lo que deben tener características similares, de acuerdo con las NTC 17, se debe obtener el espesor de la diagonal (bd) que se calculan con la ecuación 1 (Ec.1)

$$bd = \frac{1}{2} \sqrt{lc^2 + lv^2} \leq \frac{ld}{4}$$

*Ecuación 1.- Ecuación para obtener el espesor de la diagonal, (NTC,17).*

En donde lc (Ver Ec.2) y lv (Ver Ec.3), son las longitudes de contacto del muro con la columna y con la viga, respectivamente y ld (Ver Ec.4) es la longitud de la diagonal

$$lc = \frac{\pi}{2} \left( \frac{4 Ef Ic H}{Em t Sen(2\theta d)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

*Ecuación 2. Ecuación para calcular la longitud de contacto entre el muro y la columna, (NTC, 17).*

$$lv = \pi \left( \frac{4 Ef Iv L}{Em t Sen(2\theta d)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

*Ecuación 3. Ecuación para calcular la longitud de contacto entre el muro y la viga, (NTC 17).*

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

*Ecuación 4. Ecuación para calcular la longitud de la diagonal, (NTC 17).*

En donde los términos de las ecuaciones son los siguientes; Ef, Em son el módulo de elasticidad, para cargas de corta duración, del material del marco y de la mampostería respectivamente; Ic, Iv son los momentos de inercia de la sección transversal bruta de la columna y de la viga; H es la altura libre del muro; L es la longitud del muro y  $\theta d$  es el ángulo que forma la diagonal del muro con la horizontal. Para entender mejor el acomodo de la diagonal y de sus elementos ver la figura 16.

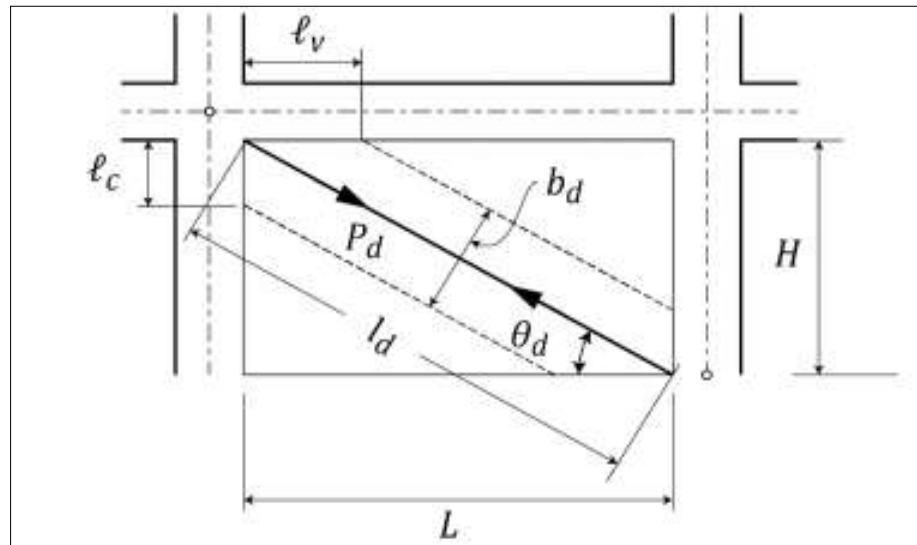


Figura 16. . Geometría de la diagonal equivalente, (NTC,17).

El modelo 11 se divide en 11 a y 11 b, en el 11 a, se modela 1 sola diagonal con se muestra en la figura 14, y en el 11 b como en el resto de los modelos que usan diagonal equivalente se utilizan 3 diagonales como se muestra en la figura 17.

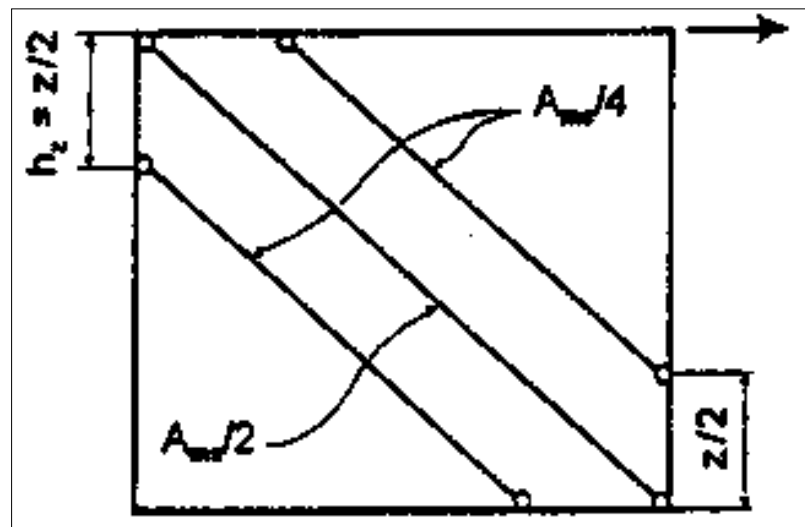


Figura 17. Esquema del modelado de las 3 diagonales en los modelos.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



Una vez que se tienen todas las diferentes propiedades, el consejo del proyecto “Resiliencia Sísmica”, propuso una serie de combinaciones para analizar cual condición puede ser más desfavorable.

Una de las combinaciones usadas, fue probar con diferentes propiedades en los materiales de acuerdo a diferentes reglamentos como se muestra en la tabla 1.

Modelo	Concreto			Mampostería			
	f'c	E	Peso Volumétrico	F'm	E	G	Peso volumétrico
1	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
2	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
3	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
10	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
11	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
12	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
13	Guía Técnica 19	Guía Técnica 19	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
14	Guía Técnica 19	Guía Técnica 19	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
15	Guía Técnica 19	Guía Técnica 19	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
20	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
21	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
22	Proyecto	NTC 17	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
23	Guía Técnica 19	Guía Técnica 19	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
24	Guía Técnica 19	Guía Técnica 19	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17
25	Guía Técnica 19	Guía Técnica 19	2,400	NTC 17	NTC 17	NTC 17	NTC 17

*Tabla 1. Reglamentos usados en cada modelo para obtener las propiedades del concreto y la mampostería en los diferentes modelos.*

Otra combinación utilizada fue probar con diferentes valores para las distintas cargas de acuerdo a diferentes reglamentos, el cambio principal está en el uso de 3 espectros de diseño diferentes como lo muestra la tabla 2.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



<b>MODELO</b>	<b>Viva</b>	<b>Sísmica</b>	<b>Sobre carga NTC</b>
1	NTC 1966	Espectro 1966	si
2	NTC 1966	Espectro 1966	si
3	NTC 1966	Espectro 1966	si
10	NTC 17	Espectro NTC 17	si
11	NTC 17	Espectro NTC 17	si
12	NTC 17	Espectro NTC 17	si
13	NTC 17	Espectro NTC 17	si
14	NTC 17	Espectro NTC 17	si
15	NTC 17	Espectro NTC 17	si
20	NTC 17	Espectro registro 19S	si
21	NTC 17	Espectro registro 19S	si
22	NTC 17	Espectro registro 19S	si
23	NTC 17	Espectro registro 19S	si
24	NTC 17	Espectro registro 19S	si
25	NTC 17	Espectro registro 19S	si

Tabla 2. Reglamentos usados en cada modelo para obtener los valores de los diferentes tipos de cargas.

Y una de las combinaciones más importantes fue el uso de diferentes inercias en los elementos estructurales, con la finalidad de analizar la combinación que resulte más desfavorable para la estructura. En la tabla 3 se muestran las diferentes combinaciones, así como el reglamento de donde se obtuvo el factor de agrietamiento (agr).

Por último, en todos los modelos se incluyó un factor de reducción de rigidez en las zonas rígidas de 0.5, así como un diafragma semirígido de acuerdo a lo establecido por las NTC 17.

Todos los modelos originales fueron realizados con el software ETABS®, en donde se buscó modelar el edificio de una manera más cercana a la realidad, se obtuvieron los resultados que nos ayudan a entender de manera preliminar el comportamiento general del edificio, así como su respuesta ante las diferentes solicitaciones de carga, a partir de dichos resultados se parte para comparar con los modelos rehabilitados.



<b>Modelo</b>	<b>Columnas</b>	<b>Vigas</b>	<b>Muros Concreto</b>	<b>Reglamento</b>	<b>Muros Mampostería</b>
1	Bruta	Bruta	Bruta	NTC17	Bruta
2	Agr	Agr	Agr	NTC17	Agr *
3	Agr	Agr	Agr	NTC17	Agr *
10	Bruta	Bruta	Bruta	NTC17	Bruta
11	Bruta	Bruta	Bruta	NTC17	Bruta
12	Agr	Agr	Agr	NTC17	Agr *
13	Agr	Agr	Agr	NTC17	Agr *
14	Agr	Agr	Agr	ACI318	Agr *
15	Agr	Agr	Agr	ACI369	Agr *
20	Bruta	Bruta	Bruta	NTC17	Bruta
21	Bruta	Bruta	Bruta	NTC17	Bruta
22	Agr	Agr	Agr	NTC17	Agr *
23	Agr	Agr	Agr	NTC17	Agr *
24	Agr	Agr	Agr	ACI318	Agr *
25	Agr	Agr	Agr	ACI369	Agr *

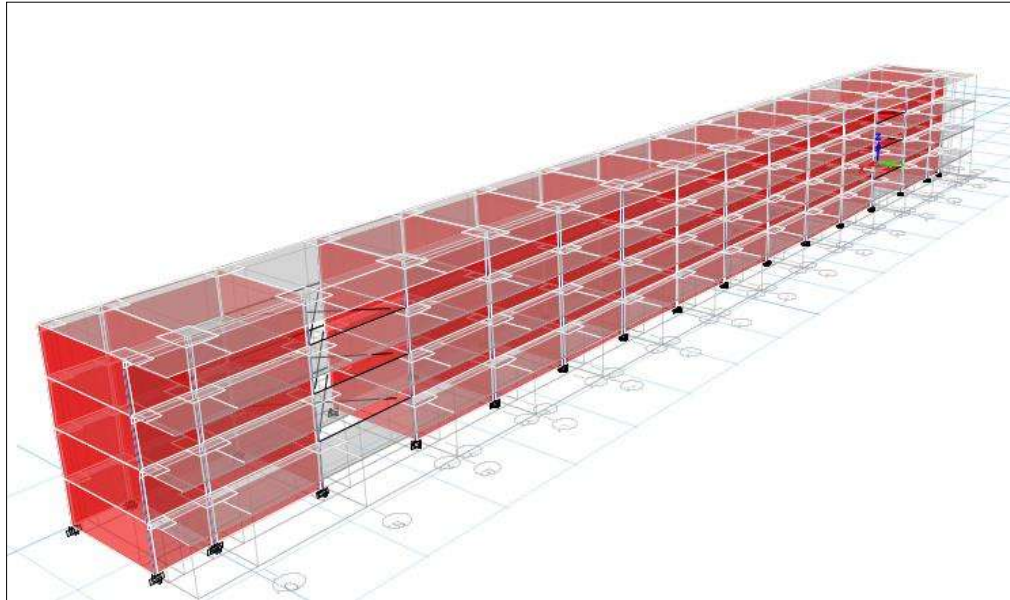
Tabla 3. Reglamentos usados para afectar las inercias de los diferentes elementos estructurales. Agr; agrietada  
\* Los muros de mampostería no se afectaron de acuerdo a ningún reglamento, si no que tuvieron una reducción de inercia con base en su comportamiento, de manera general fue una reducción del 50% de acuerdo al comité del proyecto Resiliencia Sísmica.

## 5.1 MODELOS DEL EDIFICIO ORIGINAL EN ETABS®

Una vez se tienen todos los datos para incluir en los modelos, se procede al modelado con el uso del software ETABS®, el cual es un software innovador usado para el análisis estructural y el dimensionamiento de edificios, creado por la empresa Computers and Structures®.

El funcionamiento de ETABS® es muy sencillo, a través de una ventana se seleccionan los materiales, propiedades y secciones transversales a trabajar, los cuales se

asignaron como se menciona anteriormente (Ver capítulos 4 y 5). Para el dimensionamiento del edificio se utiliza un mallado que sirve como guía, la geometría usada es la descrita en el capítulo 4 y una vez establecido el mallado se procede a insertar los elementos con las propiedades previamente asignadas, en la figura 18 se puede ver una imagen del modelo.



*Figura 18, Imagen del edificio modelado en ETABS®.*

Una vez se tiene el modelo listo, se procede a asignar las cargas, el proceso es el siguiente:

1. Se definen los patrones de carga (load patterns), que se refieren a la distribución espacial de un conjunto de fuerzas, desplazamientos o temperaturas; para nuestros modelos se usaron patrón de carga viva y patrón de carga muerta (peso propio, carga muerta de diseño y sobrecarga).
2. Se definen los casos de carga (load cases), que definen de qué forma se aplicarán los patrones de carga (estática o dinámicamente), cómo será la respuesta de la estructura (lineal o no lineal) y como se desarrollará el análisis



- (modal, integración directa, entre otros), todos nuestros patrones de carga se aplicaron de forma estático lineal, excepto por los espectros de diseño.
3. Los espectros se ingresan como funciones de espectro de respuesta y en el caso de carga se aplica como espectro de respuesta, y se aplican en dirección longitudinal o transversal según sea el caso.
  4. Se definen las combinaciones de carga, entendamos como sentido longitudinal al sentido largo del edificio y como sentido transversal al sentido corto del edificio; se usaron 2 combinaciones: en la combinación longitudinal, se sumó el 100 por ciento de la carga viva más el 100 por ciento de las 3 cargas muertas (peso propio, sobrecarga y carga muerta de diseño) más el 100 por ciento del espectro en el sentido longitudinal más el 30 por ciento del espectro en sentido transversal, y para la combinación transversal se sumó el 100 por ciento de la carga viva más el 100 por ciento de las 3 cargas muertas más el 100 por ciento del espectro en sentido transversal más el 30 por ciento del espectro en sentido longitudinal. Dichos combos aplican para todos los modelos, excepto los modelos 20,21,22,23,24 y 25 en donde se omite el 30 por ciento de los espectros en sentido transversal y longitudinal, ya que usan espectros obtenidos de registros actuando de forma simultánea en ambas direcciones.
  5. Una vez están definidos los patrones y casos de carga, se asignan los valores de carga mencionados en el capítulo 5 sobre los elementos estructurales del modelo y se procede a correr el análisis.

Después de ejecutar el análisis, se analizan los resultados obtenidos para emitir conclusiones al respecto.



## 5.2 RESULTADOS

### 5.2.1 Periodos

Los primeros resultados que se analizan son los periodos de vibrar, los cuales son propiedades dinámicas del edificio, dichas características son generadas por la geometría de la estructura, la masa sobre el edificio y los materiales. Como vimos anteriormente en el capítulo, se combinaron una serie de reducciones de inercia y de reducción en las propiedades de los materiales, por lo que se esperaba que los modelos se fueran volviendo más flexibles y los periodos fueran aumentando, como se muestra en la figura 19, recordemos que los modelos 10 a 15 son iguales a los modelos 20 a 25 con la diferencia del espectro que se usa, por lo que sólo se consideran del modelo 1 al 15.

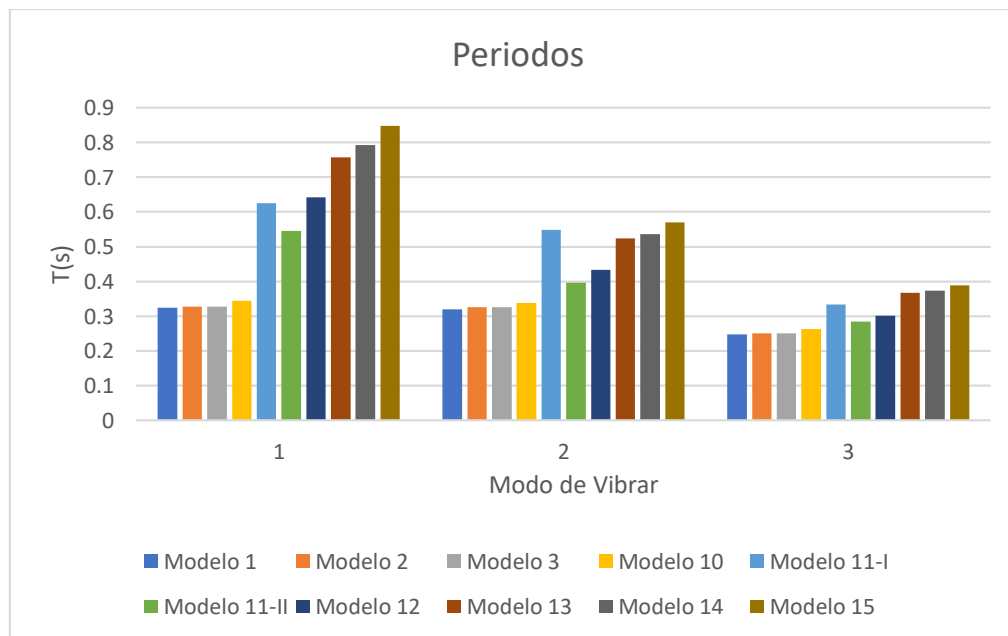


Figura 19. Gráfica que muestra el comportamiento de los periodos para los diferentes modelos.





## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



Como podemos observar, el cambio mayor se presenta entre los modelos 10 a 11 que es el modelo donde se comienzan a utilizar las diagonales equivalentes el cual es 80% mayor, por su parte la mayor diferencia se da entre el modelo 1 que tiene un periodo de 0.324 s y el 15 que tiene un periodo de 0.84 s que representa una diferencia del 160%. Por otro lado, podemos observar que el modo 1 el cual se da en la dirección longitudinal, es el que presenta mayores variaciones, a diferencia del modo 2 en dirección transversal y el modo 3 en torsión los cuales presentan variaciones menores entre modelos. Con respecto a los espectros utilizados, el cambio en los periodos no representa un incremento considerable en las aceleraciones tomando en cuenta los modelos con mayor y menor periodo como se ve en la figura 20.

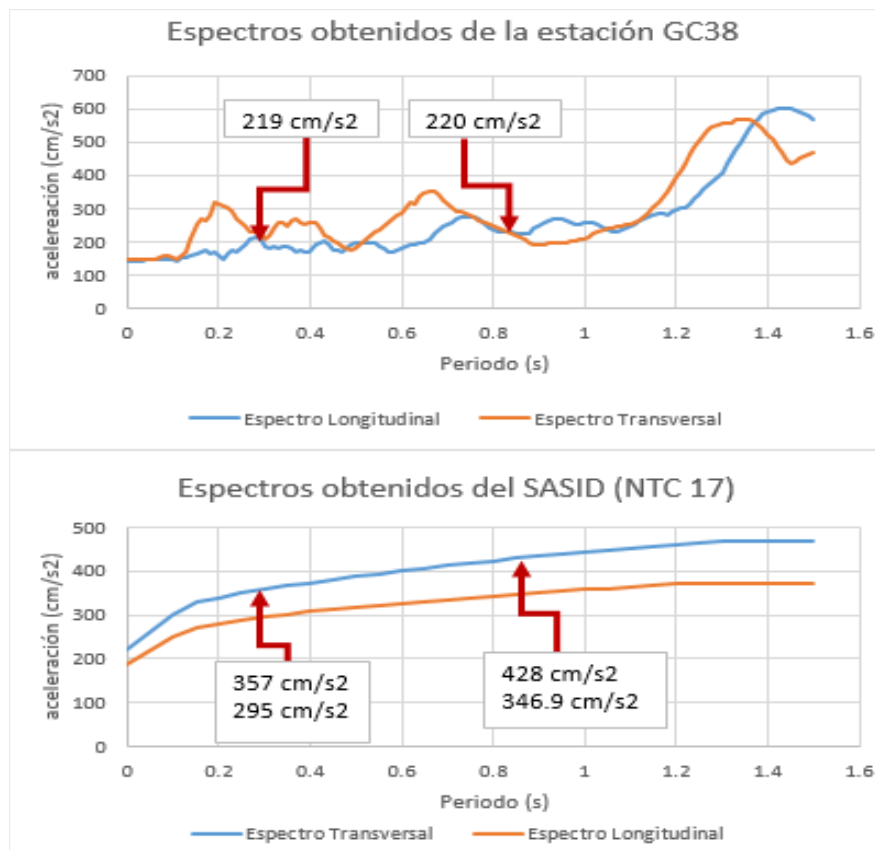


Figura 20. El cambio de las aceleraciones por la diferencia entre periodos es muy bajo de 0 % en la estación GC38 y 14 % en los espectros del SASID.



### 5.2.2. Desplazamientos y distorsiones

Los desplazamientos (Fig.21 y Fig.22) y las distorsiones (Fig.23 y Fig.24), también son elementos importantes a analizar, entendamos por distorsión al desplazamiento de entrepiso dividido entre su altura, y es una medida importante, ya que nos indica de mejor manera el nivel de daño de la estructura.

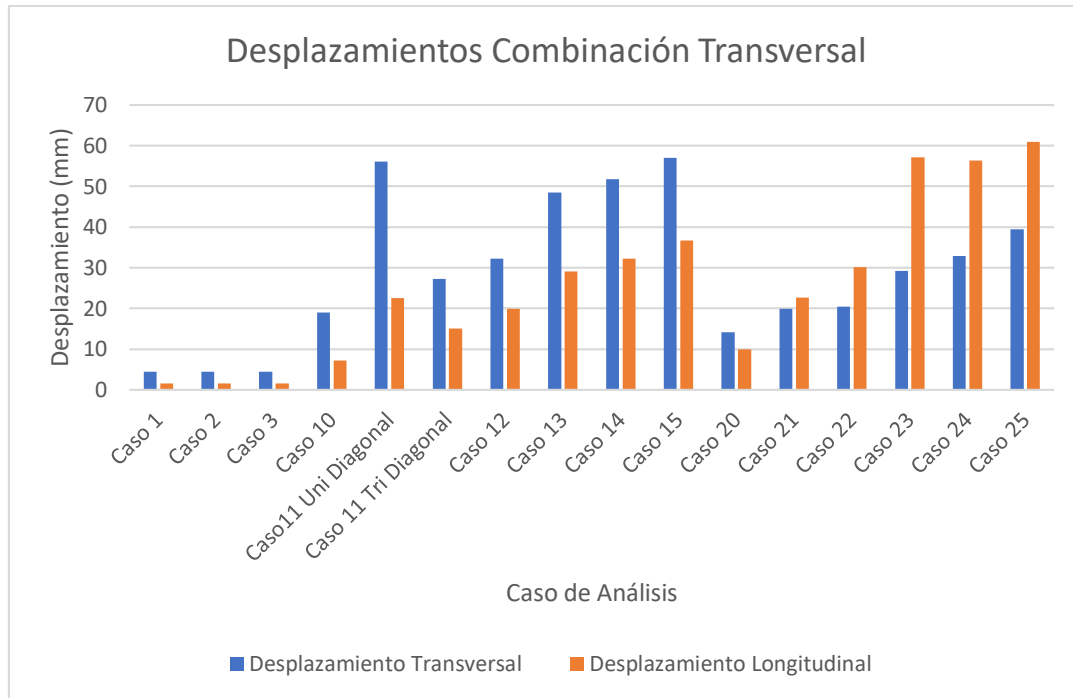


Figura 21. Gráfica donde se muestra el comportamiento de los desplazamientos provocados por la combinación transversal.

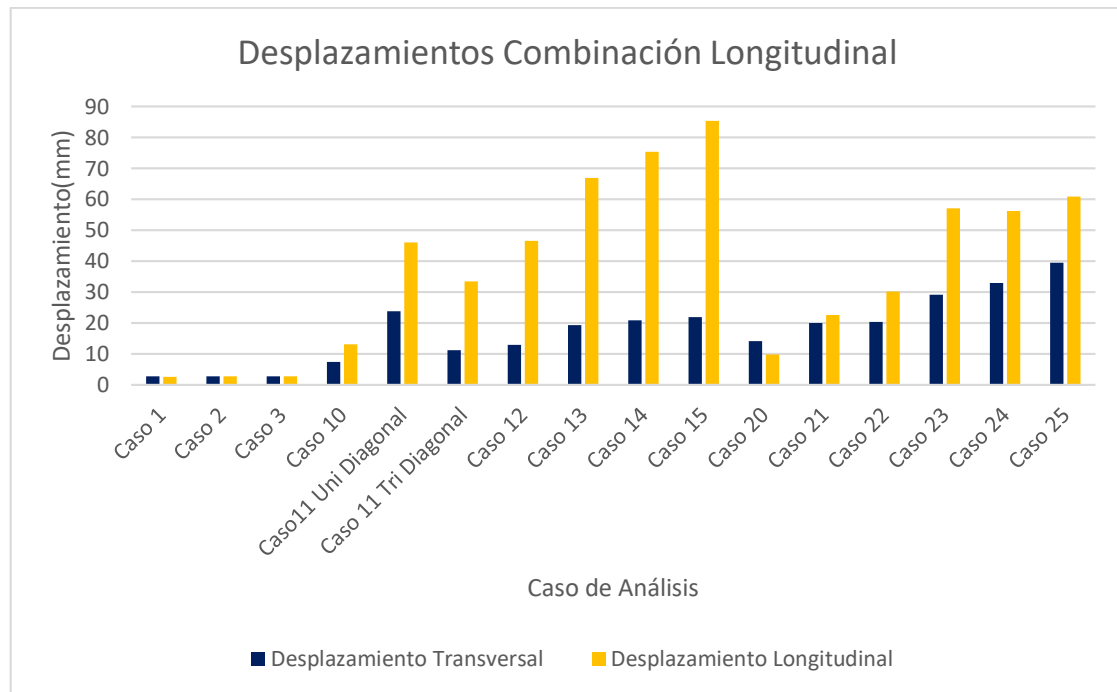


Figura 22. Gráfica donde se muestra el comportamiento de los desplazamientos provocados por la combinación longitudinal.

En las gráficas anteriores se puede apreciar que los desplazamientos van incrementando conforme la inercia en los modelos va disminuyendo, el modelo que presenta los desplazamientos mayores en la dirección transversal es el modelo 11-a es decir el que tiene sólo una diagonal equivalente lo que significa que es muy flexible en esa dirección.

También se puede ver que los modelos 10 a 15 presentan desplazamientos mayores que los modelos 20 a 25 en la dirección longitudinal esto debido a que la demanda sísmica propuesta en las NTC 2017 produce mayores desplazamientos que la respuesta debida al espectro de 2017 derivado del registro más cercano al edificio.

De manera general también se puede apreciar que los desplazamientos longitudinales son mayores a los transversales, en los modelos 20 a 25 los cuales tienen la misma combinación de carga, lo que nos da indicios de que la dirección longitudinal es más flexible, esto puede ser debido a que en las zonas de escaleras hay discontinuidades.



Las distorsiones de entrepiso son importantes para entender el comportamiento del edificio ante los cambios de inercia, rigidez y solicitaciones de carga.

Estos se obtienen dividiendo los desplazamientos de entrepiso entre la altura de cada nivel, por lo que se expresa de manera adimensional. Analizaremos las figuras 23, 24, 25 y 26 para ver lo que sucedió con el modelo ante los diferentes cambios de variables.

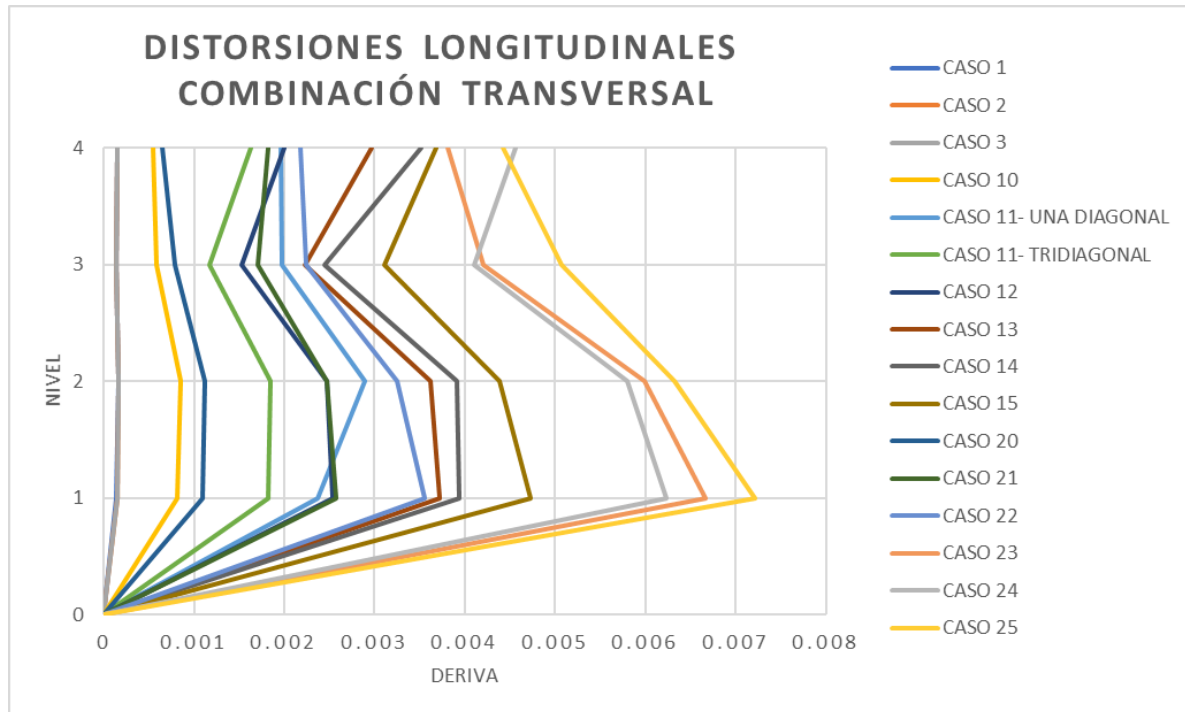


Figura 23. Distorsiones longitudinales por combinación de carga transversal.

Para este análisis conviene mencionar que las NTC 17 marcan como límite una distorsión de 0.002 para condición de servicio y de 0.005 para colapso.

Partiendo de eso, los modelos 1, 2, 3, 10, 11 con tridiagonal y 20 están por debajo del límite de servicio, y los modelos 23, 24 y 25 sobrepasan el límite por colapso; los modelos que tienen el espectro obtenido de la estación GC38 tienen mayores distorsiones con respecto a los modelos que usaron espectros del SASID y de las NTC 1966 debido a que la combinación de carga no tiene reducción en comparación a los otros registros que tienen sólo



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



el 30% de la demanda en dirección longitudinal; también se observan que los modelos con mayor reducción en sus inercias presentan las distorsiones más grandes.

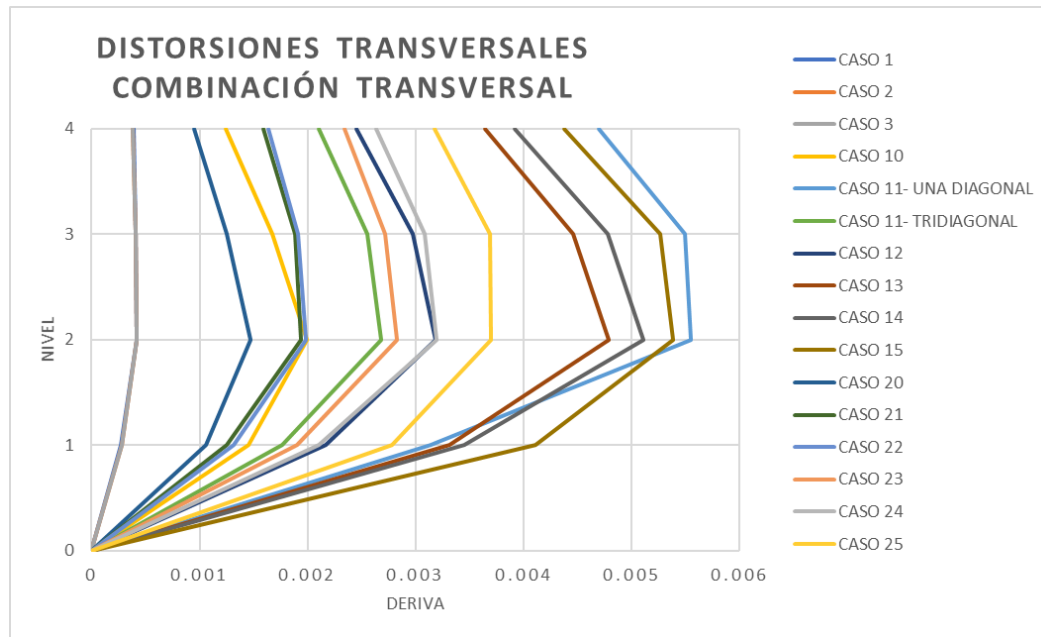


Figura 24. Distorsiones transversales por combinación de carga transversal.

Para la condición de distorsiones transversales por combinación transversal, se aprecia que los modelos 1, 2, 3, 10, 20, 21 y 22 están por debajo del límite de servicio (0.002) y únicamente los modelos 14, 15 y 11 con una diagonal sobrepasan el límite por colapso (0.005) siendo el modelo 11 con una diagonal el que tiene las mayores distorsiones; a diferencia de las distorsiones longitudinales por la misma combinación, aquí las mayores distorsiones se dan en los modelos que tienen el espectro del SASID ya que tiene mayores aceleraciones y no tiene reducción en este sentido; comparando con las distorsiones en dirección longitudinal para la misma condición de carga se ven valores menores siendo 0.0055 la distorsión máxima contra 0.007 en la otra dirección ; también se aprecia que las curvas presentan la mayor distorsión en el nivel 2.

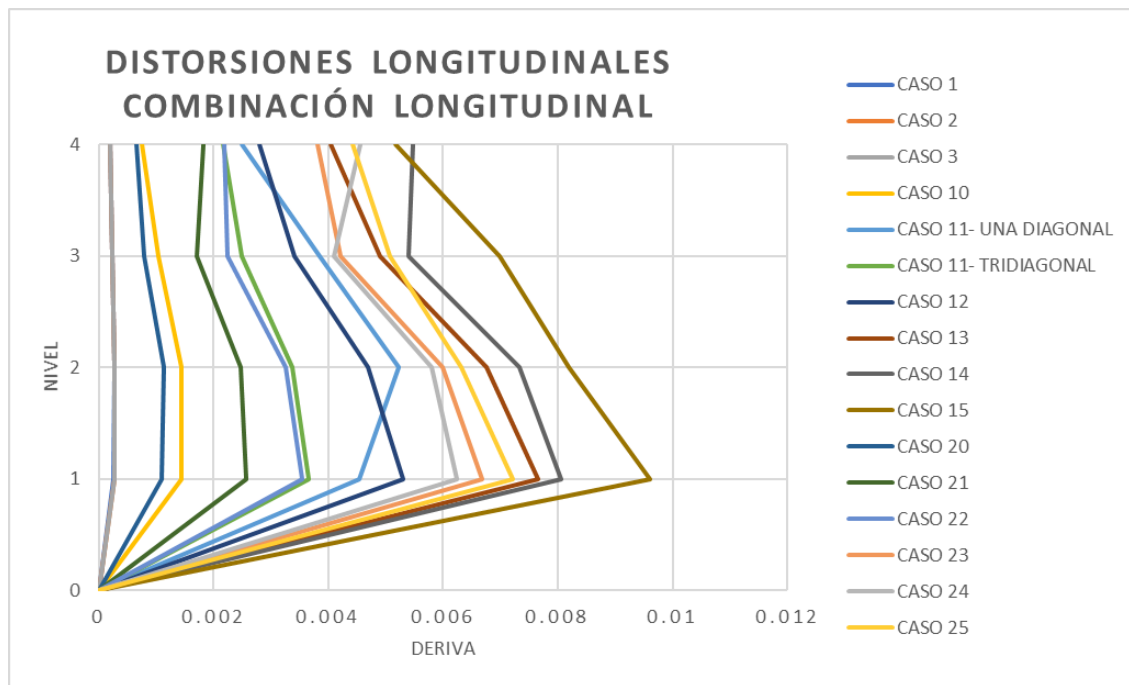


Figura 25. Distorsiones longitudinales por combinación longitudinal.

Para las distorsiones en dirección longitudinal por combinación longitudinal, los modelos 1, 2, 3, 10 y 20 están por debajo de la condición de servicio (0.002) y los modelos 11 con una diagonal, 12, 13, 14, 15, 23, 24 y 25 pasan el límite por colapso (0.005); al igual que en las distorsiones longitudinales por combinación transversal las distorsiones mayores se dan en el primer nivel; los modelos con espectros del SASID presentan distorsiones mayores; esta condición presenta los valores de distorsión más grandes llegando hasta a 0.009.

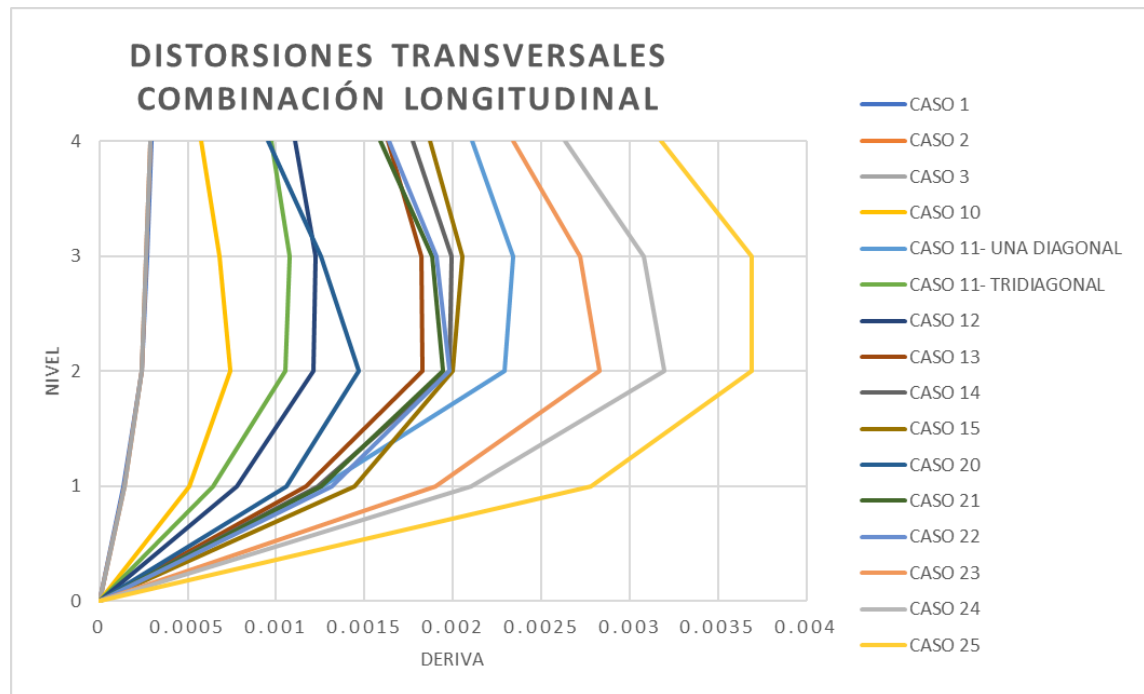


Figura 26. Distorsiones transversales por combinación de carga longitudinal.

Para las distorsiones en dirección transversal por combinación de carga longitudinal, los modelos 11 con una diagonal, 15, 23, 24 y 25 rebasan el límite por servicio (0.002) pero ningún modelo pasa el límite por colapso (0.005); también se logra ver que las mayores distorsiones se dan en el nivel 2; las mayores distorsiones se dan en los modelos con espectro obtenido de la estación GC38; y el valor máximo es de 0.0036.

De manera general podemos concluir de lo analizado anteriormente, que las distorsiones en la dirección transversal son menores que en la dirección longitudinal, lo que no indicia un mayor nivel de rigidez transversal. De manera conjunta la combinación de carga transversal genera distorsiones ligeramente mayores. La gran diferencia entre los distintos modelos lleva a casos en que la distorsión de servicio no se excede, mientras que, en el otro extremo, hay casos en los que se rebasa el límite establecido para el colapso. Esto significa que las decisiones que se toman con base en diferentes reglamentos y modelos, todos ellos reconocidos, conducen a resultados totalmente distintos.



### 5.2.3 Elementos Mecánicos

Es importante analizar los elementos mecánicos, es decir cortante, momento y carga axial, los cuales describen los esfuerzos a los que se someten los elementos estructurales del edificio como columnas, vigas, muros y la losa. El análisis ayuda para entender el nivel de daño que puede presentar una estructura.

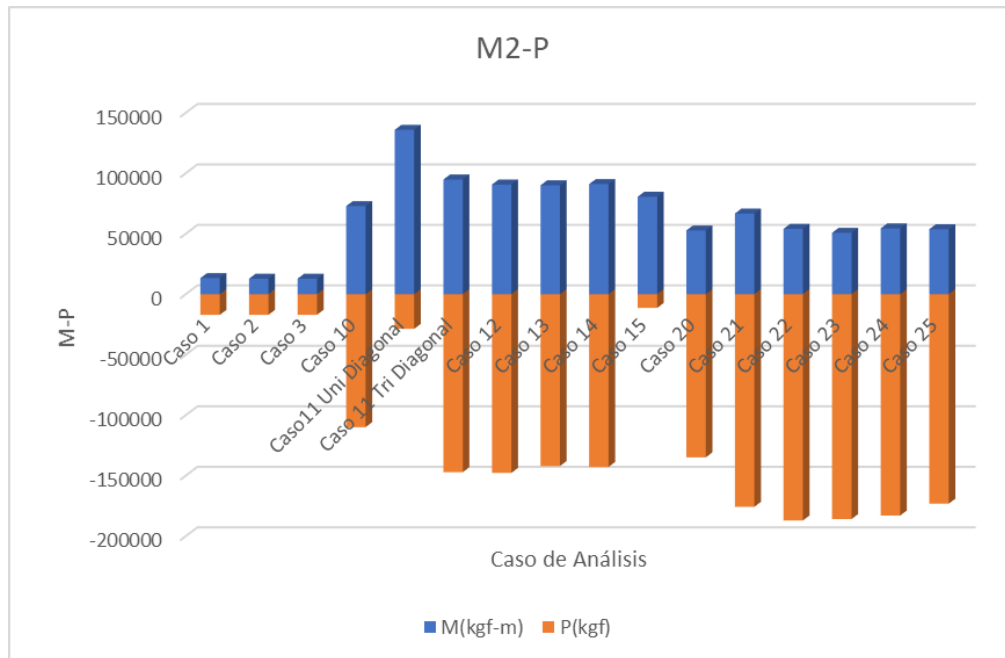


Figura 27. Gráfica de flexocompresión, donde se muestra el momento en dirección transversal con su componente de carga axial.

En la figura 27 se muestra la combinación de carga axial con el momento máximo en dirección transversal, en la gráfica se puede ver que las cargas axiales más grandes se dan en los modelos 20 a 25, esto se presenta porque se toma la totalidad de la demanda sísmica en ambas direcciones en esos modelos a diferencia de los modelos 10 a 15 en donde se toma el 100% en una dirección y el 30% en otra; los modelos 1 a 3 presentan una considerable disminución respecto a los otros modelos dado que la demanda sísmica y las cargas gravitacionales de los reglamentos utilizados son menores.





## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



El modelo 22 presenta la mayor carga axial, con un valor de 187 000 kg lo que representa un 20% de su resistencia y un momento de 54 000 kg-m.

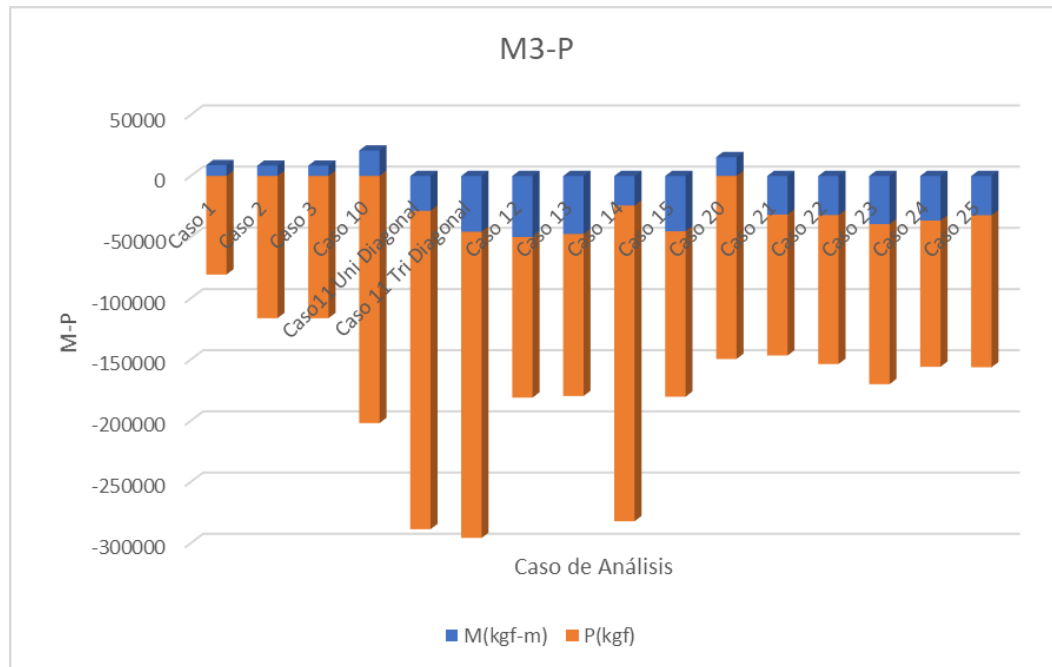


Figura 28. Gráfica de flexocompresión donde se muestra el momento en dirección longitudinal con su componente de carga axial.

En la figura 28 se muestra la combinación de carga axial con momento máximo en dirección longitudinal, a diferencia de los momentos y carga axial generados por combinación de carga transversal, la carga axial generada por la combinación de carga longitudinal es mayor en la mayoría de los casos lo que generó un mayor equilibrio en la estructura y una reducción en los momentos, el modelo 11 con 3 diagonales fue el que presentó la mayor carga axial con una carga de 260 000 kg lo que representa un 28% de la resistencia de la columna, estando aún muy por debajo de su capacidad máxima.

Las figuras 27 y 28, muestran el momento máximo en ambas direcciones con su respectiva componente de carga axial para analizar el efecto de flexocompresión en las



columnas, sin embargo, no representa la carga axial máxima de cada modelo, la cual analizaremos en la figura 29.

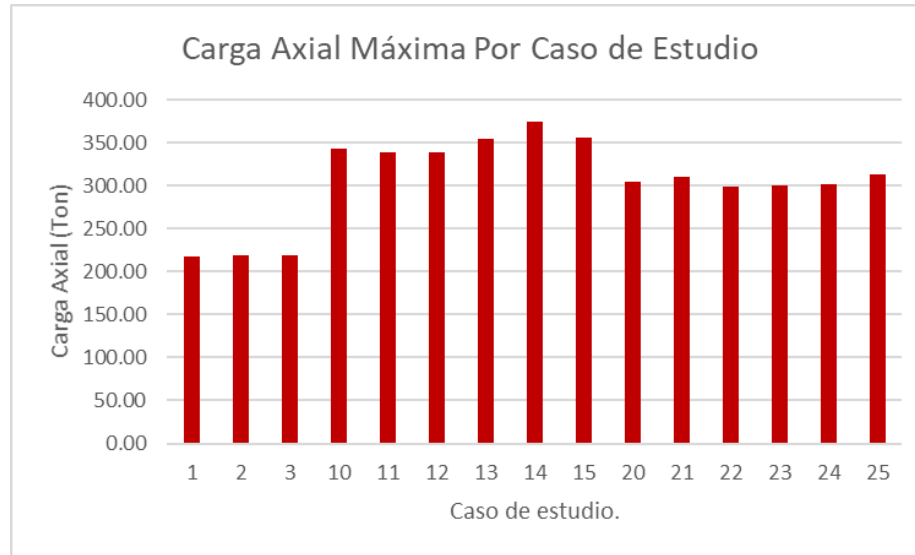


Figura 29. Gráfica que muestra la carga axial máxima en cada caso de estudio.

En la figura 29 se muestra el comportamiento de la carga axial en los diferentes modelos, se aprecia claramente como los modelos 10 a 15 tienen una carga axial mayor lo cual se puede deber al hecho de tener una demanda sísmica mayor, y los modelos 1 a 3 presentan cargas menores, el modelo 14 es el que presenta el valor mayor con una carga 375 toneladas lo que representa el 42% de la resistencia de la columna. Entre los modelos 1 a 3, 10 a 15 y 20 a 25 no se presentan variaciones importantes es decir que la carga axial se ve más afectada por las solicitaciones de carga, que por los cambios de inercia y propiedades de los materiales.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

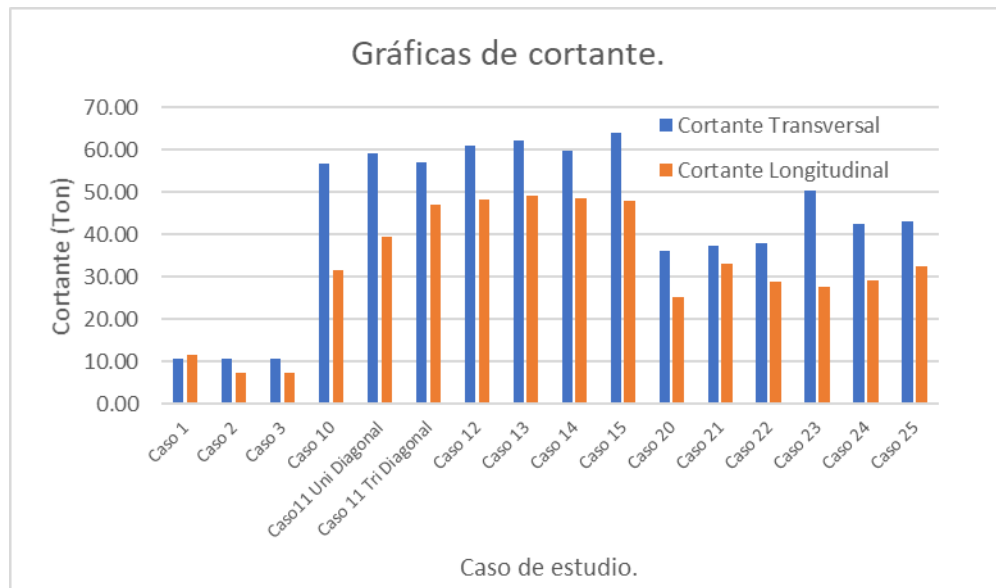


Figura 30. Gráfica que muestra el comportamiento del cortante en dirección transversal y longitudinal máximo para cada caso de estudio.

Uno de los elementos más importantes a analizar es el cortante, la variación de cortante en los diferentes modelos se ve en la figura 30, y se observa un comportamiento similar a los elementos mecánicos anteriores los cuales se ven más afectados por las diferentes solicitaciones de carga que por los cambios de inercia y las propiedades del material. Los modelos 1 a 3 presentan los cortantes menores y los modelos 10 a 15 los cortantes mayores relacionado con las solicitaciones gravitacionales y sísmicas.

También podemos ver que en todos los casos los cortantes transversales son mayores que los cortantes longitudinales.

Como hemos visto a lo largo del capítulo, hay diferentes variables que afectan el comportamiento del edificio, por lo que se decidió separar las variables para analizar mejor el efecto que tienen sobre la estructura.



## 5.3 VARIABLES

Las principales variables que tenemos en nuestro análisis son el cambio de demanda sísmica por diferentes reglamentos, el cambio de inercias y el cambio en el modelo de placas por diagonales equivalentes, se aislaron las variables y se analizó el comportamiento de la estructura.

### 5.3.1 Demanda sísmica

Como se mencionó al inicio del capítulo 5 (Ver Fig. 14 y Fig.15), se utilizaron 3 espectros diferentes: el del reglamento vigente cuando se construyó el edificio NTC 1966 (modelos 1 a 3), el de las NTC 17 (modelos 10 a 15) y el obtenido de un registro real de una estación cercana al edificio la estación GC38, durante el sismo de 2017 (modelos 20 a 25), para comparar mejor el efecto de cada espectro se tomarán únicamente los modelos 1, 10 y 20 cuyos modelos son muy similares y su única variable es la demanda sísmica. De dichos espectros el de las NTC de 1966 presentan la menor aceleración, las del reglamento de las NTC 17 presentan las mayores aceleraciones; por lo que se ha visto, se espera que la demanda sísmica de las NTC 17 provoquen mayores elementos mecánicos y un daño mayor a la estructura. Esto significa que la demanda sísmica del reglamento que se consideró en el edificio al construirse es 73% menor que la demanda ocurrida en el sismo del 2017 y 86% menor con respecto al reglamento vigente en la CDMX tomando como base la aceleración correspondiente al periodo del edificio.

En la figura 31 se analizan las distorsiones y desplazamientos, en donde se observa que las mayores se dan en el modelo 10 es decir el que tiene el espectro de las NTC 17 obtenido del SASID, para tener un punto de referencias los resultados se comparan con los obtenidos del modelo 20 ya que usa el registro real, de donde obtenemos que los desplazamientos transversales del modelo 1 son 511% menores que las del modelo 20 y los del modelo 10 son 27% mayores; en cuanto a los desplazamientos longitudinales los del modelo 1 son 373% menores que los del modelo 20 y los del modelo 10 son 33% mayores.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



Las distorsiones se comportan de manera similar, las mayores se dan en el modelo 10 y las menores en el modelo 1, en promedio las distorsiones del modelo 1 son 384% menores que las del modelo 20 en tanto las del modelo 10 son 32% mayores en promedio.

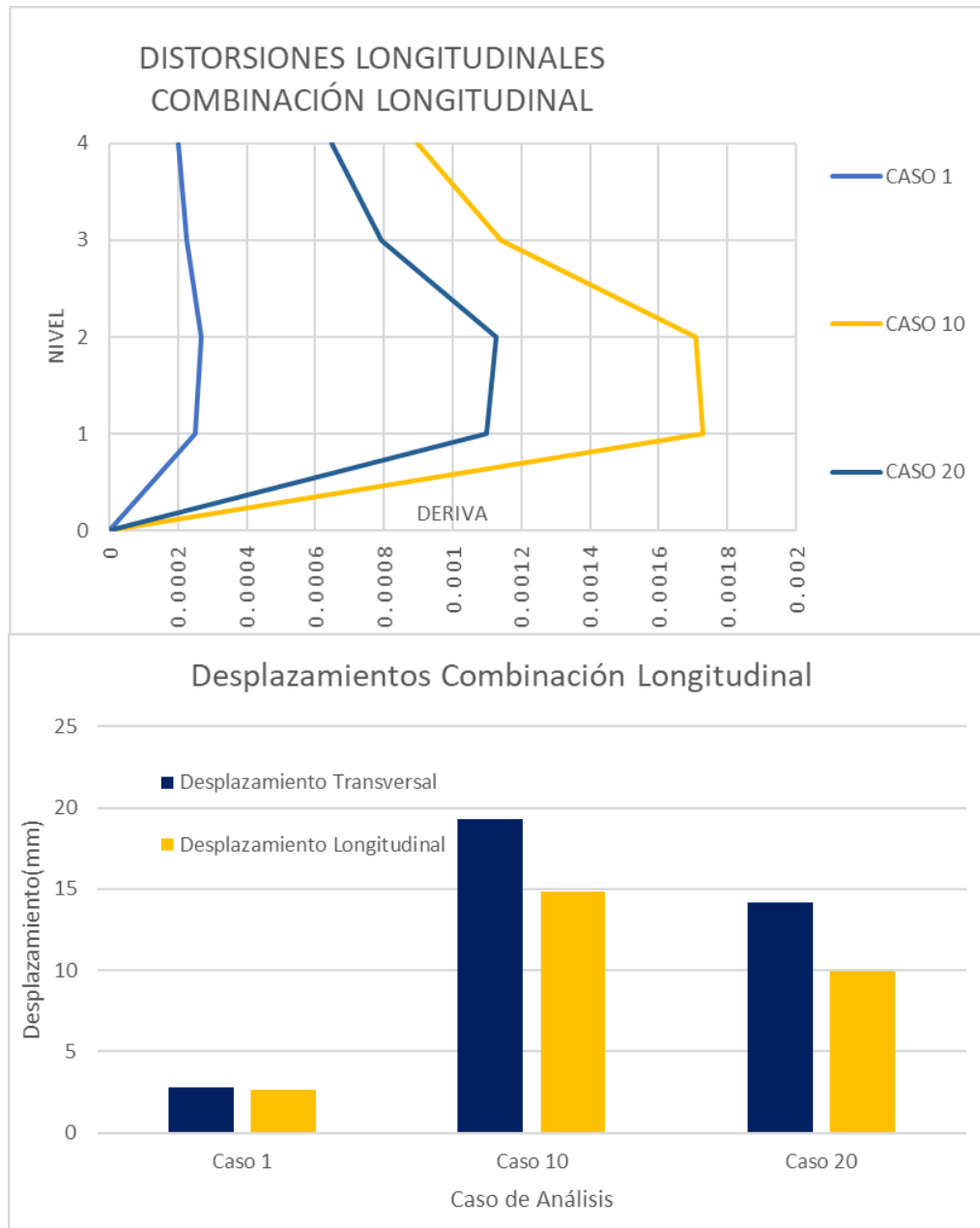


Figura 31. Gráficas que muestran las distorsiones y los desplazamientos de los modelos 1, 10 y 20.

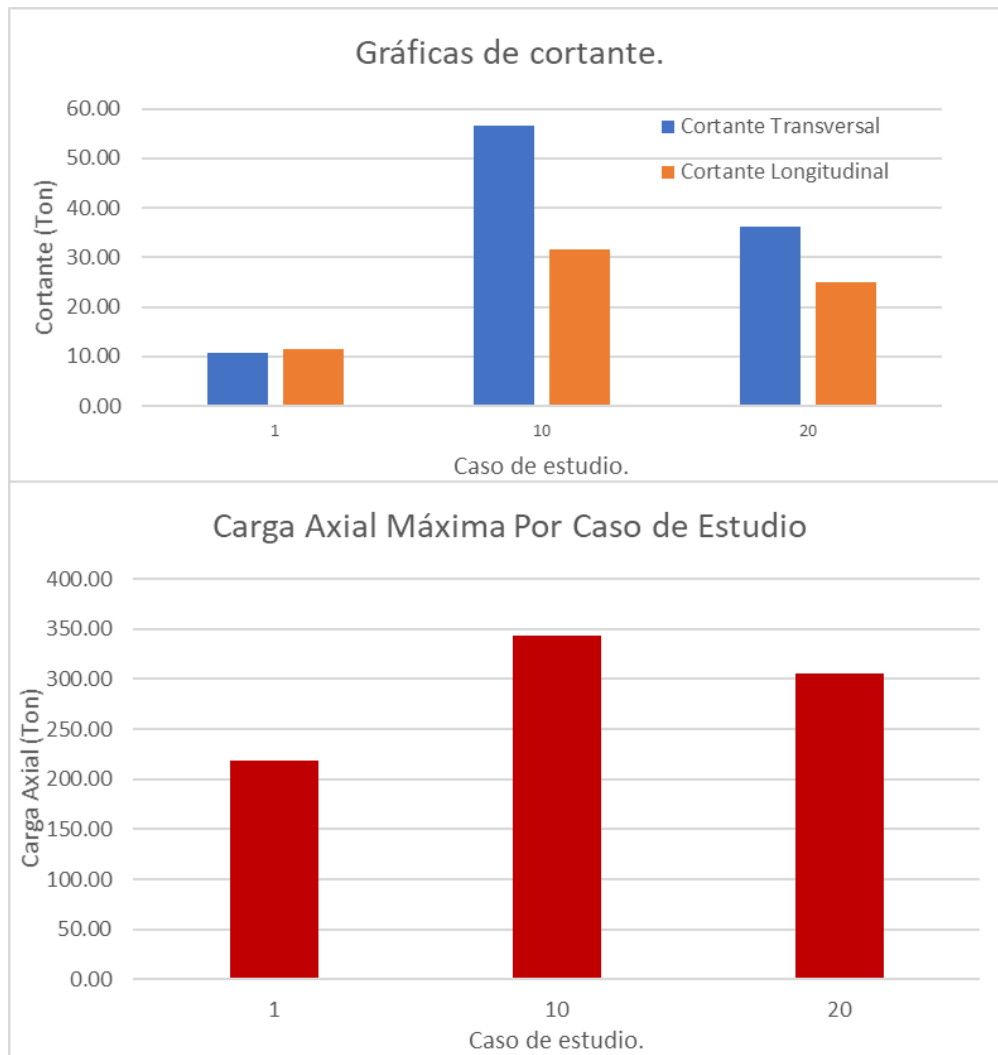


Figura 32. Gráfica de cortante y momento de los modelos 1, 10 y 20.

En la figura 32 se observa el comportamiento del cortante y la carga axial, y tiene el mismo comportamiento que los elementos anteriores los elementos mecánicos máximos se presentan en el modelo 10 y los menores en el modelo 1. Con respecto al modelo 20 el cortante transversal del modelo 1 es 336% menor y el del modelo 10 es 36% mayor; en tanto al cortante longitudinal el modelo 1 es 217% menor que el modelo 20 y el modelo 10 es 20% mayor. Con la carga axial sucede lo mismo, la carga del modelo 1 es 140% menor y la del modelo 10 es 11% mayor.



De todo lo visto en el comportamiento de la estructura, se aprecia que el modelo reaccionó ante los cambios de aceleraciones y que es una variable muy importante para considerar en el diseño y análisis de edificios. Con respecto a las demandas sísmicas propuestas por los reglamentos, se mostró una disminución considerable de las cargas, deformaciones y distorsiones al usar el espectro de las NTC 1966 con respecto a las obtenidas con el registro real, dicho comportamiento resulta peligroso para el diseño porque puede generar elementos estructurales no diseñados para soportar las solicitaciones reales. En tanto a la respuesta de la estructura ante el espectro de las NTC 17, las cargas, distorsiones y desplazamientos fueron mayores a las que se presentaban con el registro real lo que da lugar a un factor de protección a la estructura ante un posible evento de mayor intensidad. Así que cabe la pregunta, ¿Cuál es el nivel de vulnerabilidad de los edificios construidos con las normas de 1966 en la CDMX y otras partes del país ¿Qué se debe hacer al respecto?

### 5.3.2 Diagonales Equivalentes

Como se mencionó al inicio del capítulo, se realizaron modelos en donde se sustituyó el uso de placas para modelar muros, por el uso de links para simular las diagonales equivalentes. El uso de este modelo es importante, ya que el uso de elementos tipos shell no genera los desplazamientos en los muros de manera similar a como ocurre en la realidad se propone el uso de 3 diagonales (Asteris et al, 2011) conectadas al marco para tener un comportamiento teóricamente más real, ninguno de los 2 modelos supone una modelación correcta del comportamiento real de un edificio, se analiza como cada uno cambia y de qué manera afecta el empleo de uno u otro.

El cambio en este modelo generó un aumento en la flexibilidad del edificio provocando mayores desplazamientos y distorsiones, por lo que se decidió analizar esta variable por separado, para este análisis se usarán los modelos 10, 11 con una diagonal (11-A), 11 con 3 diagonales (11-B), 20 y 21.

En la figura 33 se ve el efecto del uso de diagonales equivalentes en las distorsiones y desplazamientos, comparado con el modelo 10 que utiliza placas las distorsiones del



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



modelo 11-A son en promedio 196% mayores y las del modelo 11-B son 117% mayores; y comparado con el modelo 20, las distorsiones del modelo 21 son en promedio 138% mayores.

En cuanto a los desplazamientos en el sentido longitudinal, con respecto al modelo 10 el modelo 11-A tiene un incremento del 210% y el modelo 11-B presenta un incremento del 125%; en tanto el modelo 21 tiene desplazamientos 129% mayores que el modelo 21. Con respecto a los desplazamientos transversales, los modelos 11-A y 21 también presentan desplazamientos 24% y 41% mayores, sin embargo, el modelo 11-B tuvo una disminución del 41%.





# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

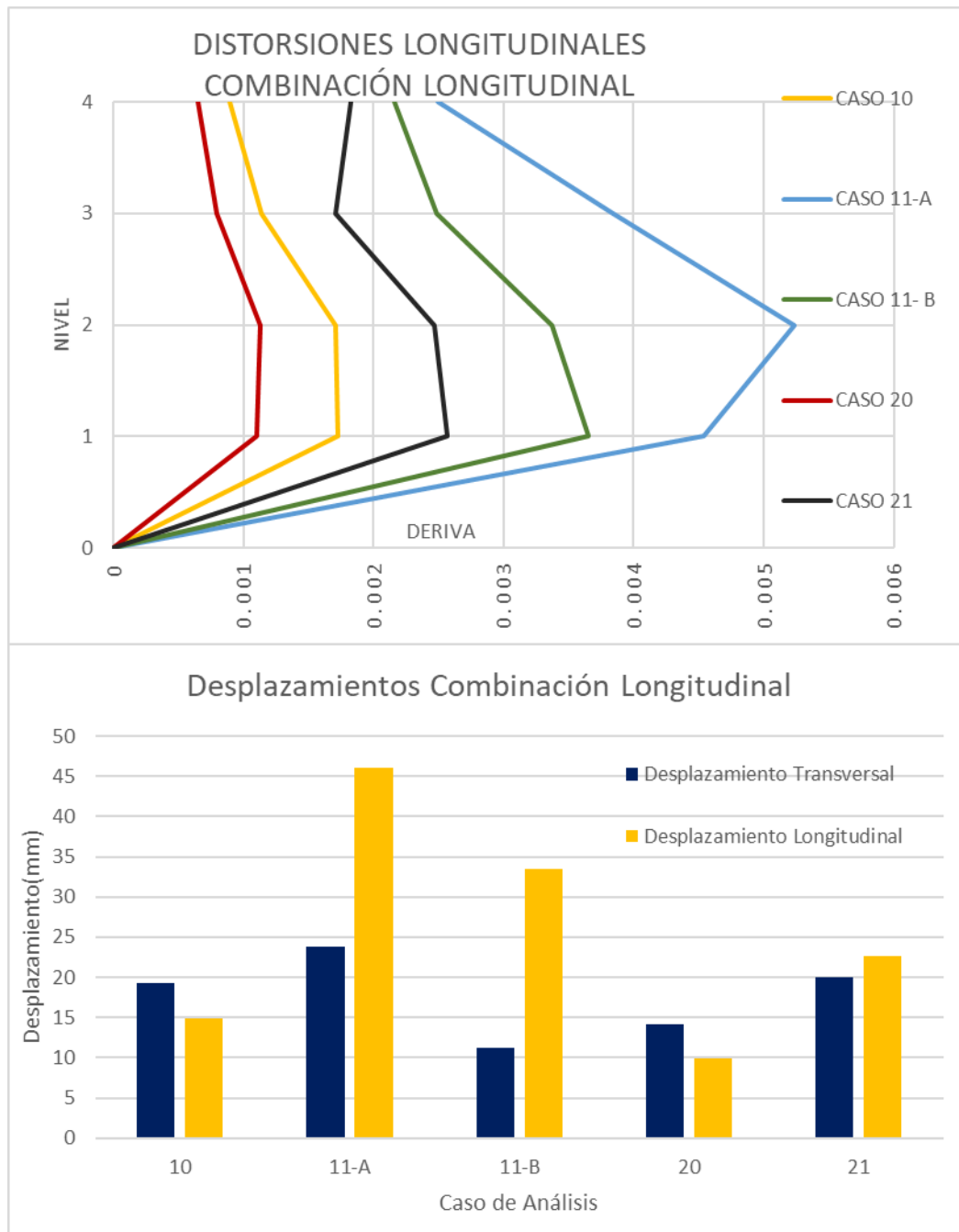


Figura 33. Gráficas que muestran las distorsiones y desplazamientos de los modelos 10, 11-A, 11-B, 20 Y 21.



Con la demanda sísmica, no había cambios en las propiedades dinámicas del edificio, pero al cambiar los elementos del modelo, estos presentan cambios importantes los cuales se analizan en la figura 34.

Se observa en la gráfica que los modelos sí presentan un aumento considerable en sus modos de vibrar en el primer modo el modelo 11-A es 82% mayor al 10 y el modelo 11-B es 58% mayor, por su parte el modelo 21 es 58% mayor al 20; en cuanto al segundo modo de vibrar ocurre el mismo comportamiento con respecto al modelo 10 el 11-A tiene un incremento del 62% y el 11-B un aumento del 17%, el modelo 21 igual es 17% mayor al 20.

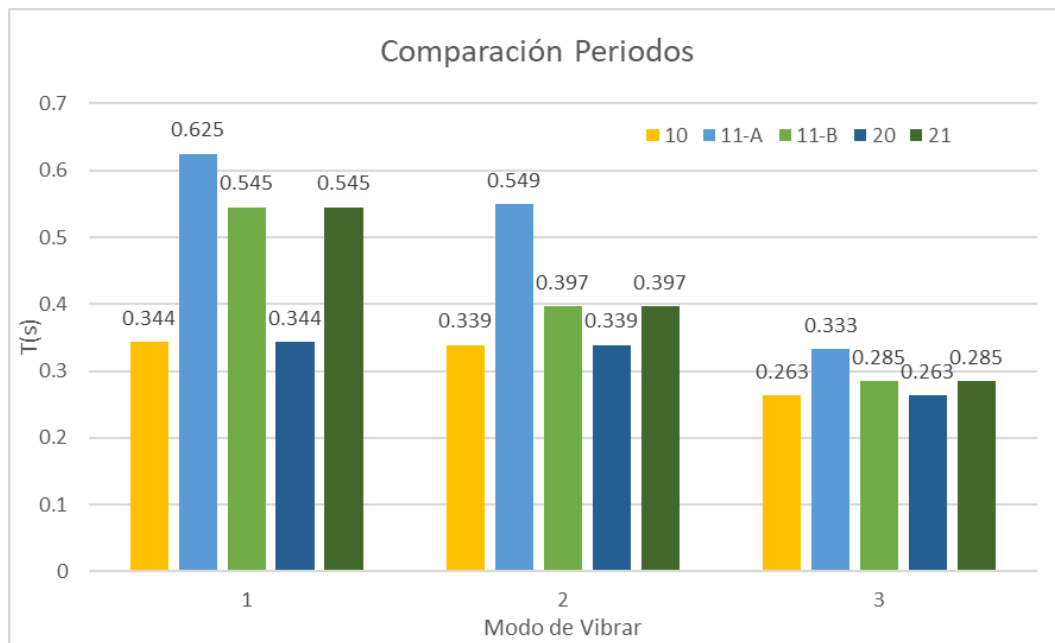


Figura 34. Modos de vibrar de los modelos 10, 11-A, 11-B, 20 y 21.

En cuanto a los elementos mecánicos (Ver Fig.35), no se aprecia un cambio o incremento significativo por el uso de diagonales equivalentes, se observa un comportamiento uniforme.

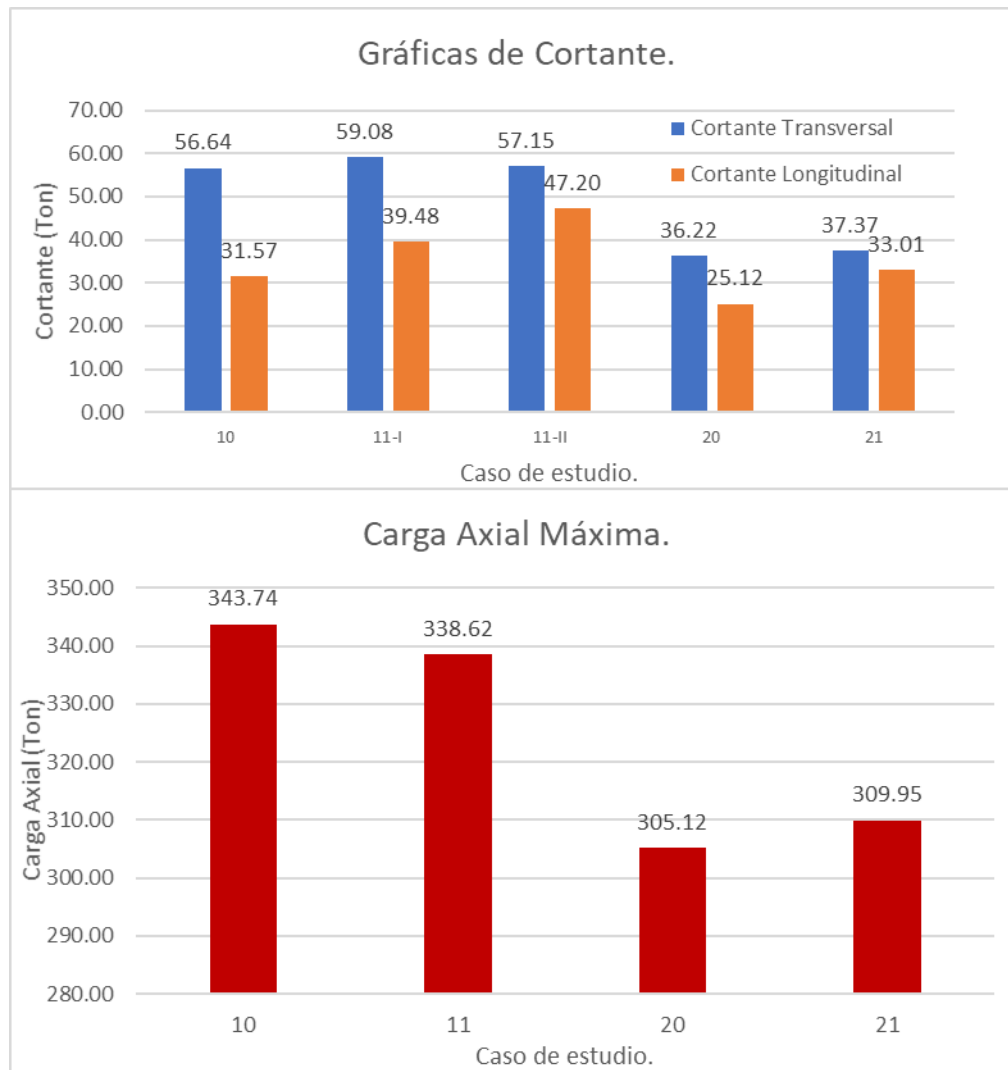


Figura 35. Gráfica de cortante y carga axial de los modelos 10, 11-A, 11-B, 20 y 21.

De lo analizado en este apartado, se concluye que las diagonales equivalentes tienen una fuerte influencia en el cambio de rigidez y flexibilidad del edificio, lo que se manifiesta en el incremento de desplazamiento, distorsiones y periodos; en cambio, no hay una variación significativa en los elementos mecánicos. Por lo que al usar diagonales en el diseño y análisis de edificios hay que tomar en cuenta el efecto de este factor; adicionalmente se observó que el uso de una sola diagonal como sugieren las NTC 17 aumenta aún más la flexibilidad del edificio a diferencia de cuando se usan las 3 diagonales como sugieren Asteris et al.



### 5.3.3 Inercia

Naturalmente la inercia afecta el comportamiento de las estructuras, recordemos que para este proyecto se trabajaron diferentes factores de reducción de inercia en los elementos estructurales, así como una reducción del módulo de elasticidad de los materiales, propuestos por diferentes códigos y normativas, lo cual generó un natural cambio en la inercia por lo que es importante analizar de qué manera esta variable afecta el comportamiento de los modelos; para el análisis de esta variable se tomarán los modelos 11-B, 12, 13, 14 y 15 ya que todos tienen las mismas solicitaciones sísmicas y gravitacionales, así como el uso de diagonales equivalentes.

Es importante recordar qué reglamento se utilizó en cada caso; el modelo 11-B presenta el área bruta; el modelo 12 tiene sección agrietada propuesta por las NTC17; el modelo 13 tiene sección agrietada propuesta por las NTC17; el modelo 14 tiene sección agrietada propuesta por el código ACI318 y el modelo 15 utiliza el código ACI369.

En la figura 36 se muestra la distorsión y desplazamiento de los modelos 11-A a 15, y se aprecia cómo van incrementando los mismos, las distorsiones van aumentando un 28% en promedio entre modelos y la mayor diferencia se da entre los modelos 11-B y 15 en donde el modelo 15 tiene distorsiones 158% mayores.

Con los desplazamientos ocurre un comportamiento similar, entre modelos se tiene un incremento de 27%, la mayor diferencia se da entre el modelo 15 y el modelo 11-B, el cual tiene deformaciones 155% mayores.

Lo que muestra que la afectación en la flexibilidad del edificio es mayor con los códigos del ACI, ya que también hay que recordar que el ACI tiene factores de reducción de inercia para más elementos como columnas, vigas, muros de concreto y losas.



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

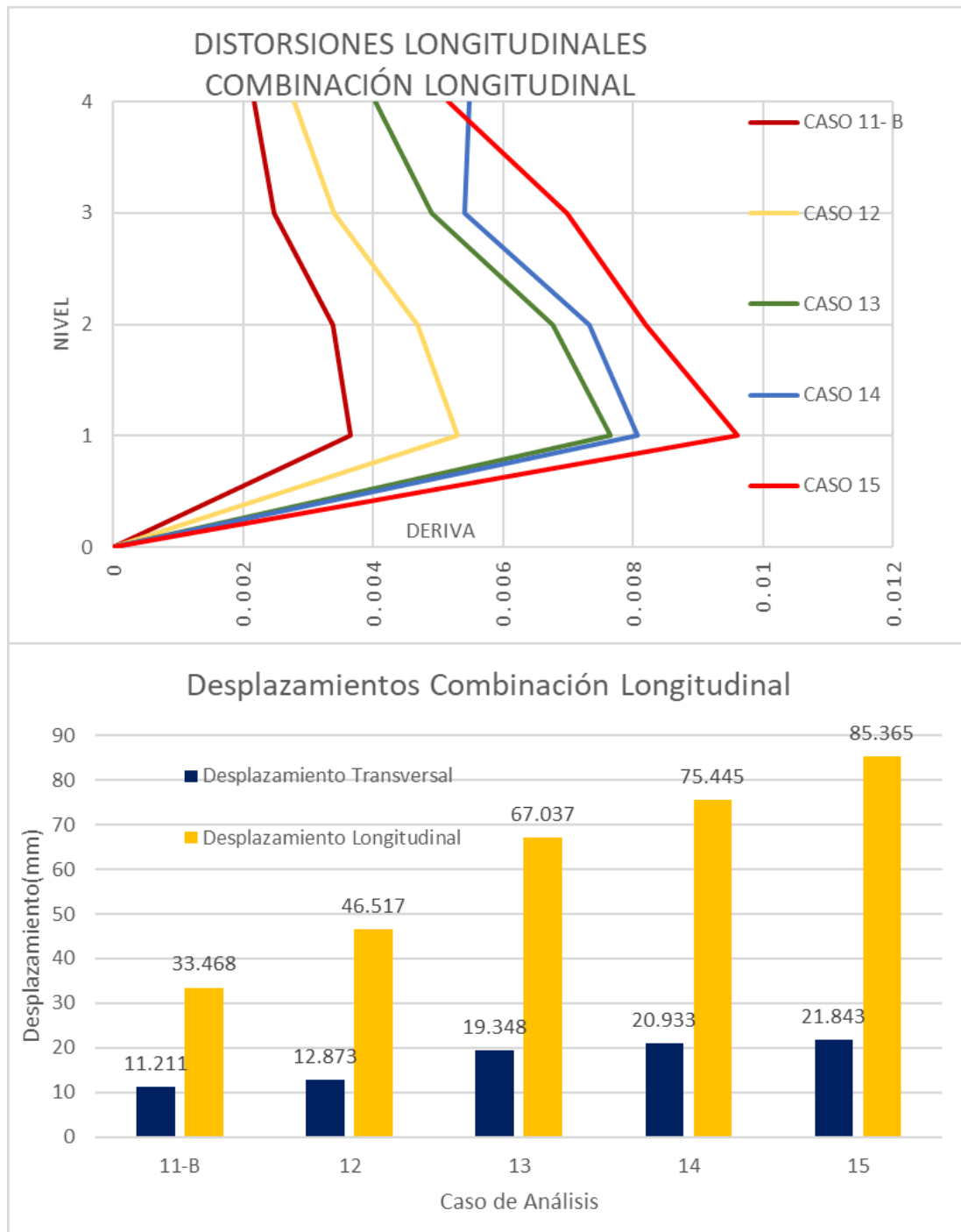


Figura 36. Gráficos que muestran las distorsiones y desplazamientos de los modelos 11-B, 12, 13, 14 y 15.



Al igual que con el cambio de placas por diagonales equivalentes, el cambio de inercias genera modificaciones en las propiedades dinámicas de la estructura como se muestra en la figura 37.

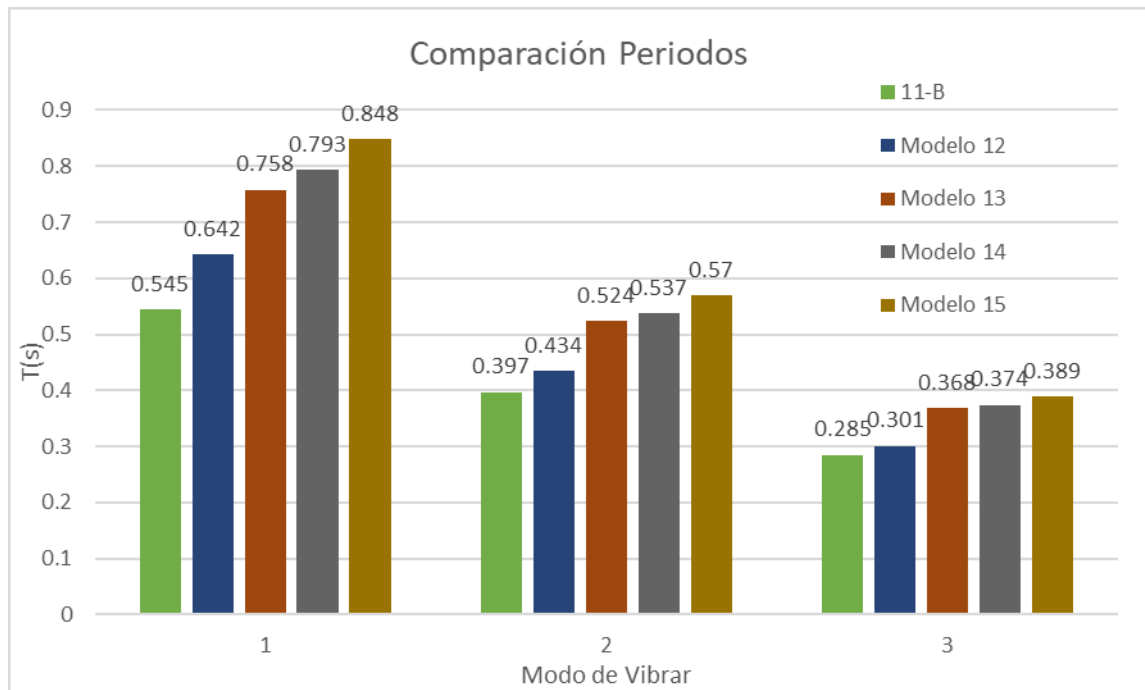


Figura 37. Periodos de los modelos 11-B, 12, 13, 14 Y 15.

Los periodos de vibrar (Ver Fig.37), van teniendo un incremento promedio de 12% entre un modelo y otro y la mayor diferencia se da entre el modelo 15 y el modelo 11-B el cual es 56% más grande, a pesar del incremento en el periodo como ya se había mostrado en la figura 20, este cambio no significa un incremento considerable en las aceleraciones para las condiciones consideradas.

Por último, se analizan los elementos mecánicos (Ver Fig. 38), en el cual no se observa un comportamiento uniforme en las cargas ni un incremento considerable sugestivo al cambio de inercia.

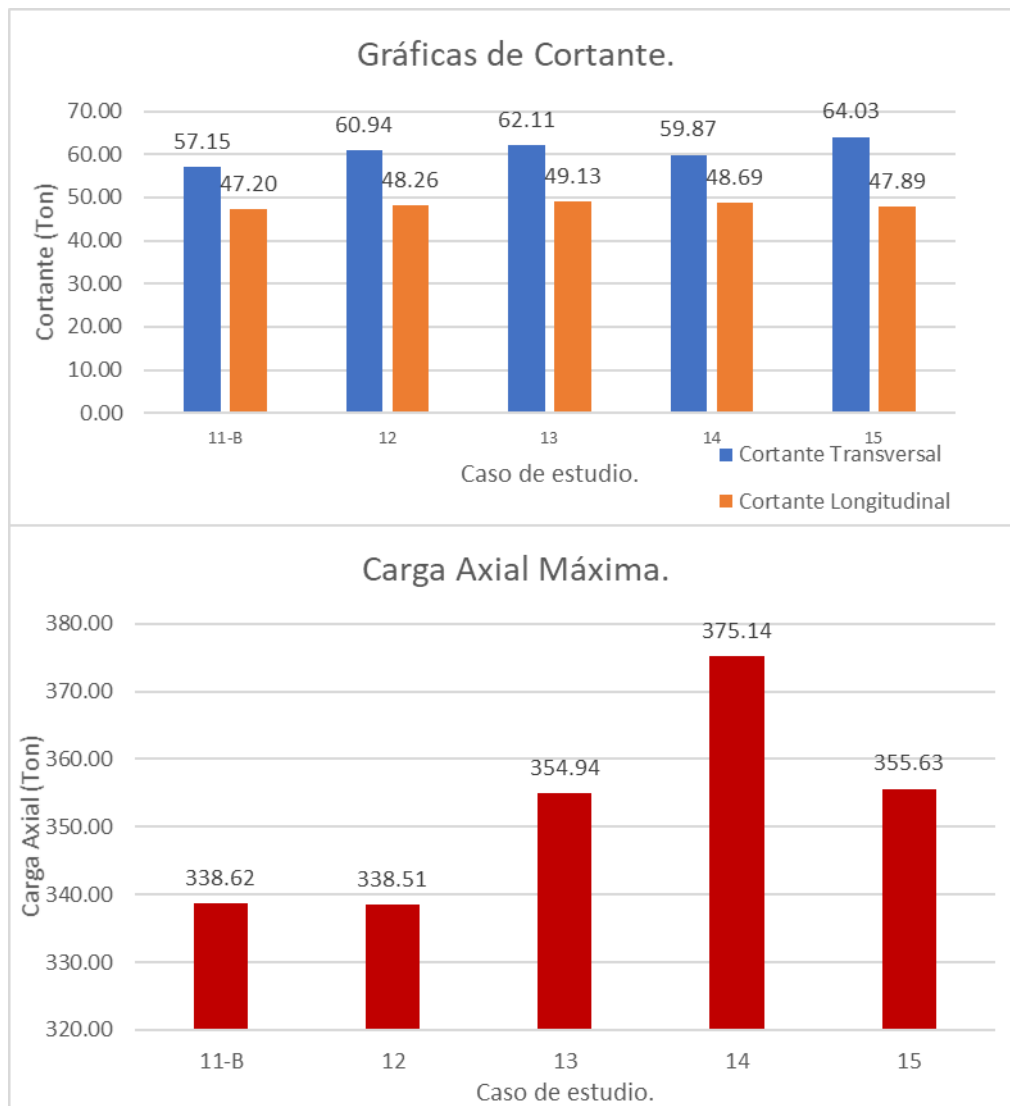


Figura 38. Gráfica de cortante y carga axial máxima de los modelos 11-B,12,13,14 y 15.

De lo anterior concluimos que la reducción de inercia por factores de agrietamiento genera cambios considerables en la rigidez y flexibilidad del edificio, lo que produce un aumento de distorsiones y deformaciones; en tanto con los elementos mecánicos su interferencia es mínima, caso contrario al cambio en la demanda sísmica, la cual si genera variaciones importantes en los elementos. Esta situación nos conduce a pensar en la gran



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



variedad de criterios que proponen las normas de mayor uso en nuestro país y las muy distintas consecuencias que se derivan de su aplicación.





## CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DEL MODELO REHABILITADO

Ahora que se ha revisado el modelo original y cómo afecta cada variable a su comportamiento, es importante analizar los cambios que son generados por la rehabilitación del edificio. Como se vio en el capítulo 4, el edificio requirió un elaborado sistema de rehabilitación que consistió en la incorporación de elementos de refuerzo como concreto lanzado a los muros, ángulos y placas de acero en algunas columnas, vigas metálicas en la zona de escaleras y principalmente el uso de cables de acero postensados.

El modelo rehabilitado se realizó con el software SAP2000®, debido a que el software ETABS® no contenía un mecanismo de modelado de cables satisfactorio, el cambio de software representó complicaciones, sin embargo, se logró homologar de manera correcta ambos modelos y se procedió a la incorporación de los elementos de refuerzo.

El modelo reforzado presentó un comportamiento similar al modelo original, sin embargo, la incorporación de cables generó un comportamiento no lineal. La variable más importante para analizar es la comparación entre los modelos originales y rehabilitados los cuales presentaron variaciones interesantes.

### 6.1 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los modelos rehabilitados; periodos, desplazamientos, distorsiones y elementos mecánicos para revisar la participación del refuerzo.

#### 6.1.1 Periodos

Los periodos de los modelos rehabilitados (Ver Fig.39) se mantienen iguales en los modelos 1 a 10, los cuales no presentan ningún cambio significativo en la geometría e inercia, del modelo 10 al 11 B (Con 3 diagonales equivalentes) se presenta un salto del 46% el cual pasa de 0.29 s a 0.54 s, el modelo 15 presenta el mayor periodo con un valor de 0.73 s; al igual que con los modelos originales, la disminución en la inercia genera un incremento en los periodos.

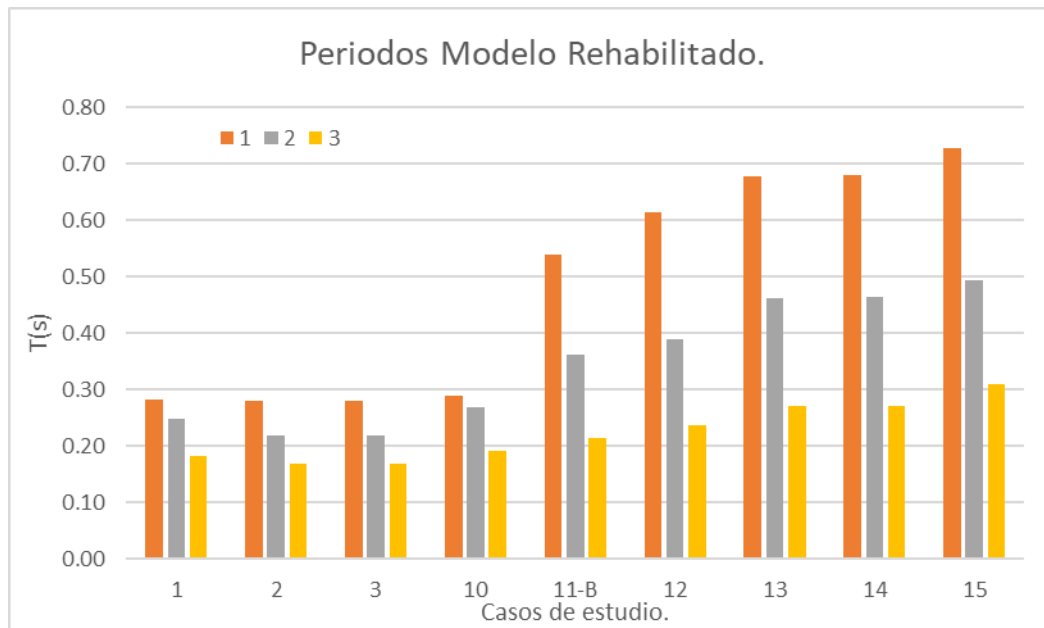


Figura 39. Modos de vibrar de los modelos rehabilitados.

### 6.1.2 Desplazamientos y distorsiones

En la figura 40 se pueden ver los desplazamientos transversales y longitudinales por ambas combinaciones de carga, en donde los modelos sin diagonales en ambas direcciones presentan desplazamientos de menos de 5 mm; los mayores saltos se dan entre los modelos 10 a 11-B el cual presenta desplazamientos longitudinales 8 veces mayores y desplazamientos transversales hasta 95 veces más grandes, de manera general los desplazamientos longitudinales son mayores que los transversales, sin embargo, los casos 11B y 15 transversales conducen a los mayores desplazamientos de todos.

En las distorsiones (Ver Fig. 41 y Fig. 42) ocurre un comportamiento interesante, los modelos que consideran los muros como elementos tipo placa, presentan distorsiones muy pequeñas que dada la no linealidad del edificio generan un comportamiento no uniforme; en tanto los modelos que consideran los muros como diagonales equivalentes, generan distorsiones más grandes, aunque tienen un comportamiento uniforme.



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

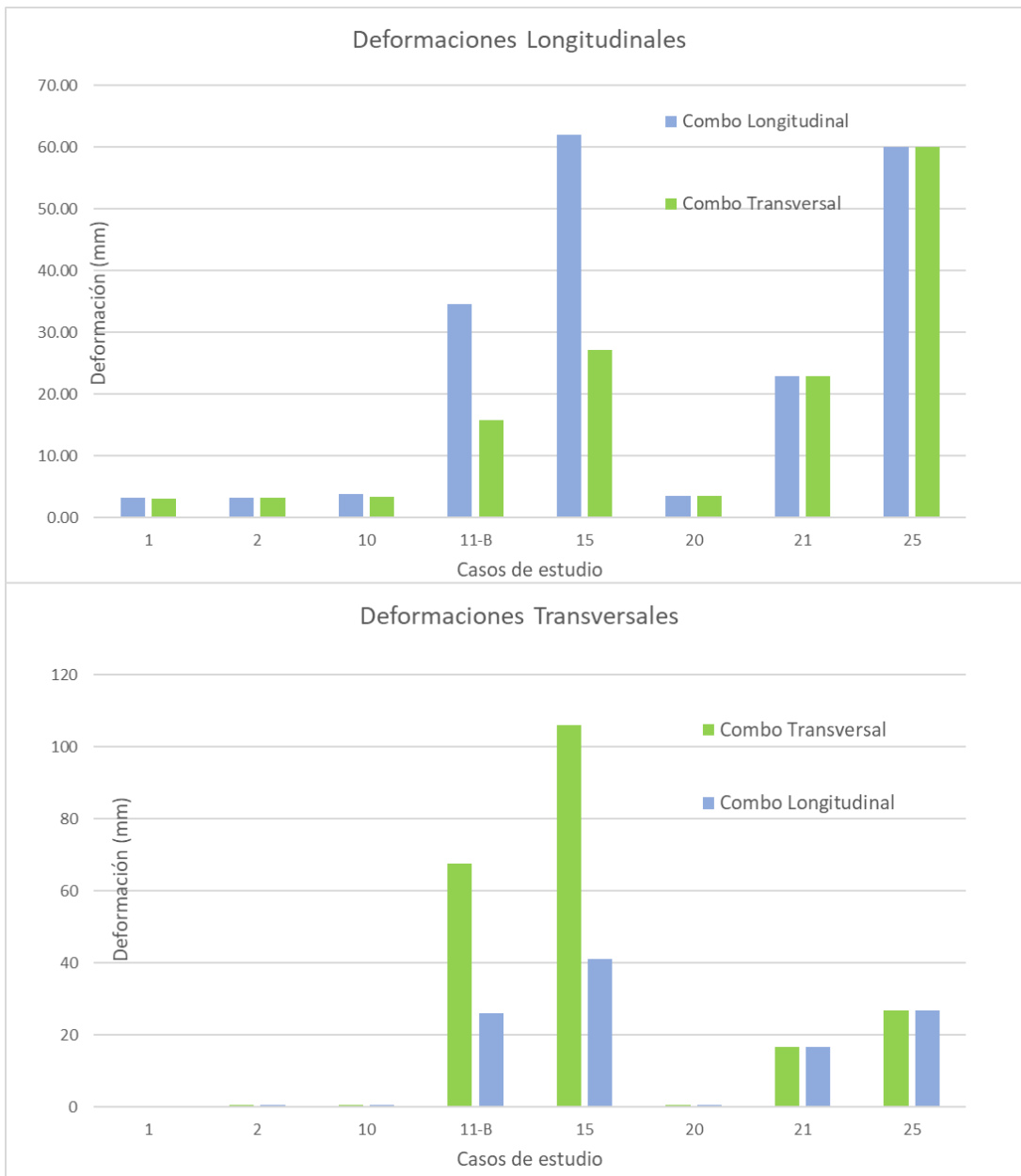


Figura 40.- Deformaciones transversales y longitudinales para ambas combinaciones de carga en los modelos rehabilitados.

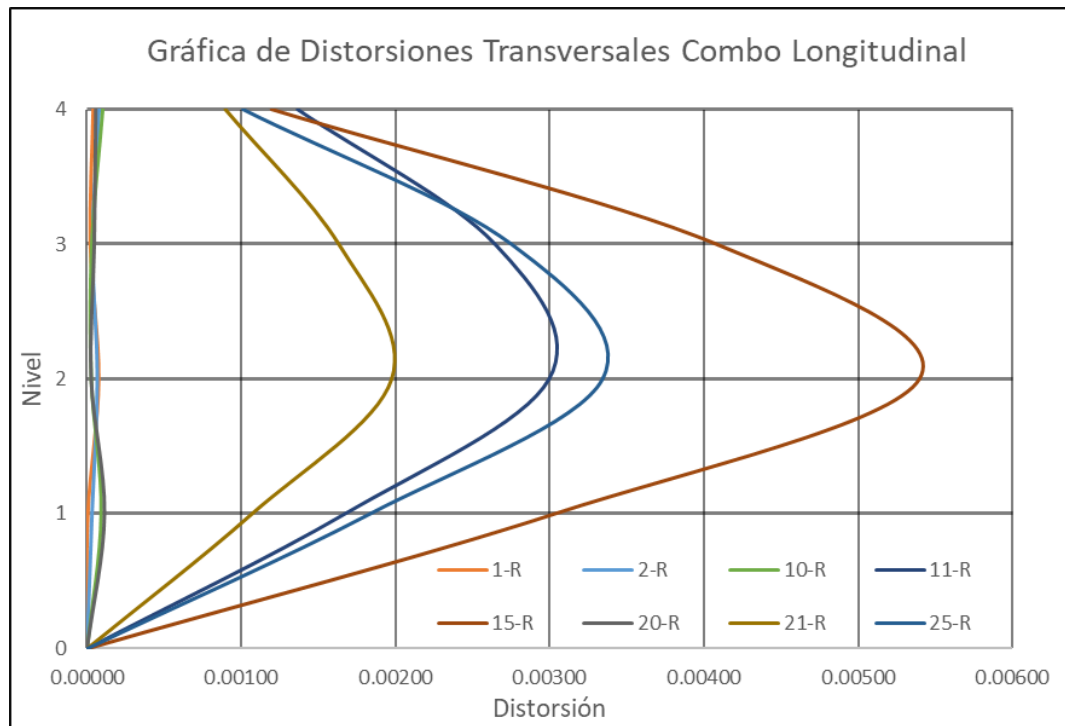


Figura 41. Distorsiones transversales en los modelos rehabilitados por combinación de carga longitudinal.

En las distorsiones transversales (Ver Fig. 41), los modelos 25 y 11 superan el límite de servicio que es de 0.002, en tanto el modelo 15 supera el límite de colapso el cual es 0.005; la mayor distorsión se da en el nivel 2, los modelos que usan placas para modelar muros presentan distorsiones muy pequeñas de en promedio 0.00004.

Un comportamiento similar se ve en las distorsiones longitudinales (Ver Fig. 42), los modelos 11 y 21 pasan el límite de servicio de 0.002 y los modelos 15 y 25 pasan el límite de colapso de 0.005, llegando casi a 0.007; en esta dirección las mayores distorsiones se dan en el tercer nivel a diferencia del modelo original en donde se dan en el primer nivel, esto se asocia a la incorporación de las vigas de acero para generar continuidad, se hablará más acerca de los cambios entre modelos más adelante.

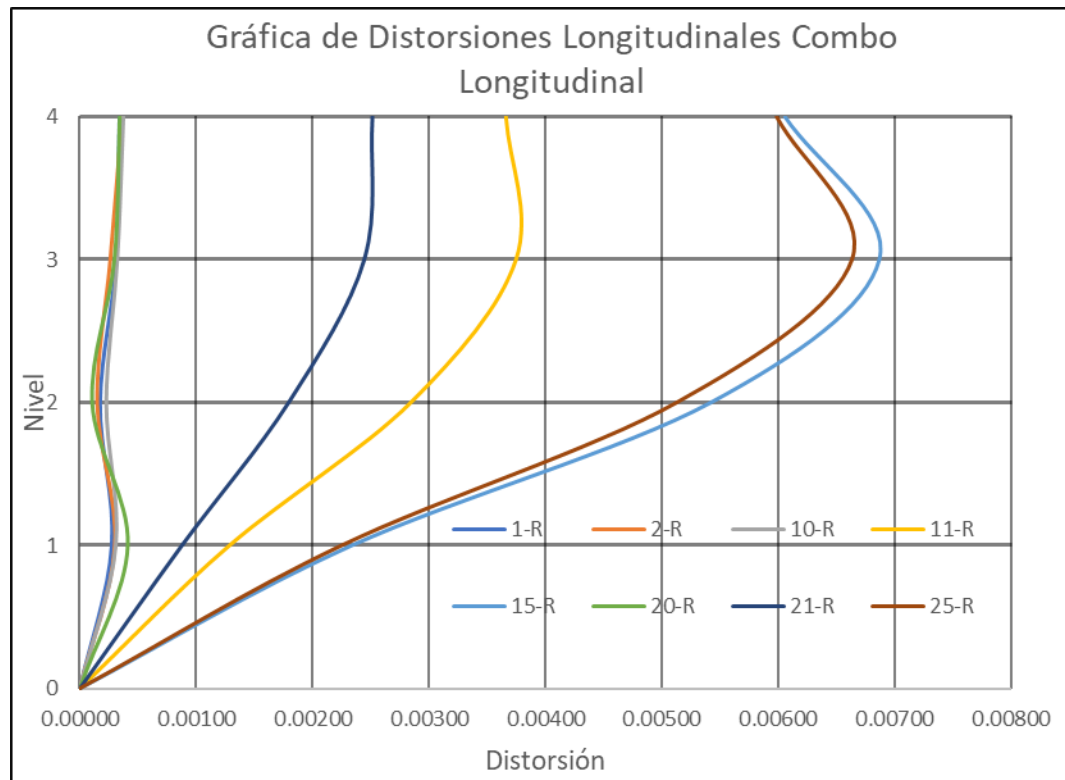


Figura 42. Distorsiones longitudinales en los modelos rehabilitados por combinación de carga longitudinal.

En ambas direcciones los modelos presentan un comportamiento similar, distorsiones muy bajas con el uso de placas generando un comportamiento no lineal, y distorsiones altas con el uso de diagonales equivalentes que generan un comportamiento más uniforme. Si el modelo se realiza con la opción de muros se llega a la conclusión de que el edificio cumple sobradamente con las limitaciones de las normas, mientras que, con los modelos de diagonales se llegaría a la conclusión de que el edificio no cumple con las normas.

### 6.1.3 Elementos Mecánicos

Se analizará el comportamiento de los elementos mecánicos ante las diferentes variables para los modelos rehabilitados, en este subcapítulo no se realizarán comparaciones entre los modelos originales y rehabilitados, si no que nos enfocaremos en su comportamiento.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



Para el análisis de los elementos mecánicos, se eligieron 5 columnas debido al gran número de elementos existentes.

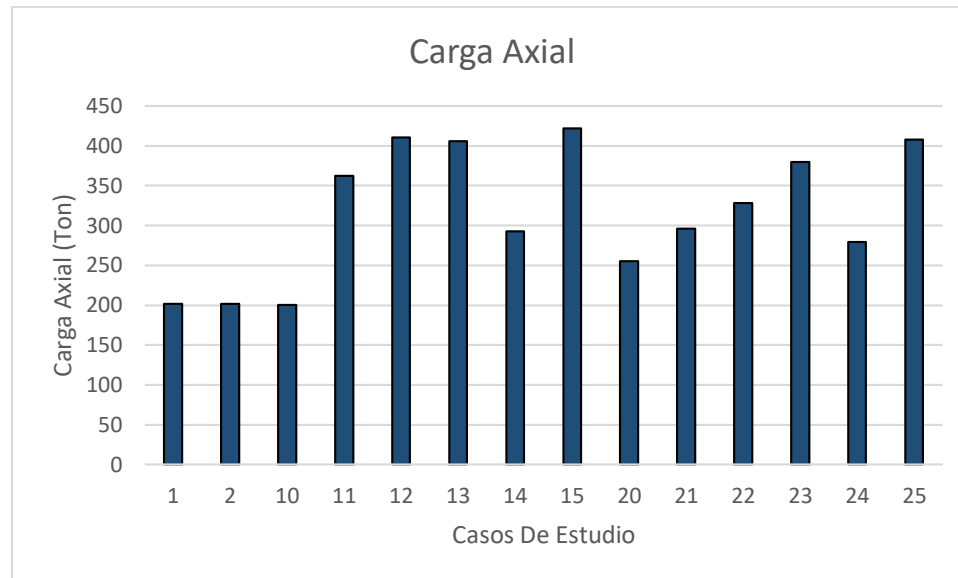


Figura 43. Carga axial de los diferentes modelos rehabilitados.

La carga axial (Ver Fig. 43), muestra un incremento del 16% en promedio en los modelos con diagonales con respecto a los modelos con placas y se da un ligero incremento del 7% en promedio de los modelos con espectro del SASID, con respecto a los modelos que utilizaron registro de la estación GC38, la carga máxima es de 410 toneladas, que representa un 47% de su resistencia axial máxima.

Con el cortante (Ver Fig. 44), ocurre un comportamiento similar, el cortante transversal de los modelos con el registro de 2017 es 376% mayor que los modelos con demanda sísmica del reglamento de 1966 y 62% mayores que los modelos con espectros de las NTC 17, también se ven que los modelos con diagonales tienen un incremento de cortante del 400% en promedio con respecto a los modelos con placas. Además, el cortante en dirección transversal es mayor que el longitudinal debido a que en dirección longitudinal se incorporaron los cables que contribuyen a llevar la fuerza lateral a la cimentación



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

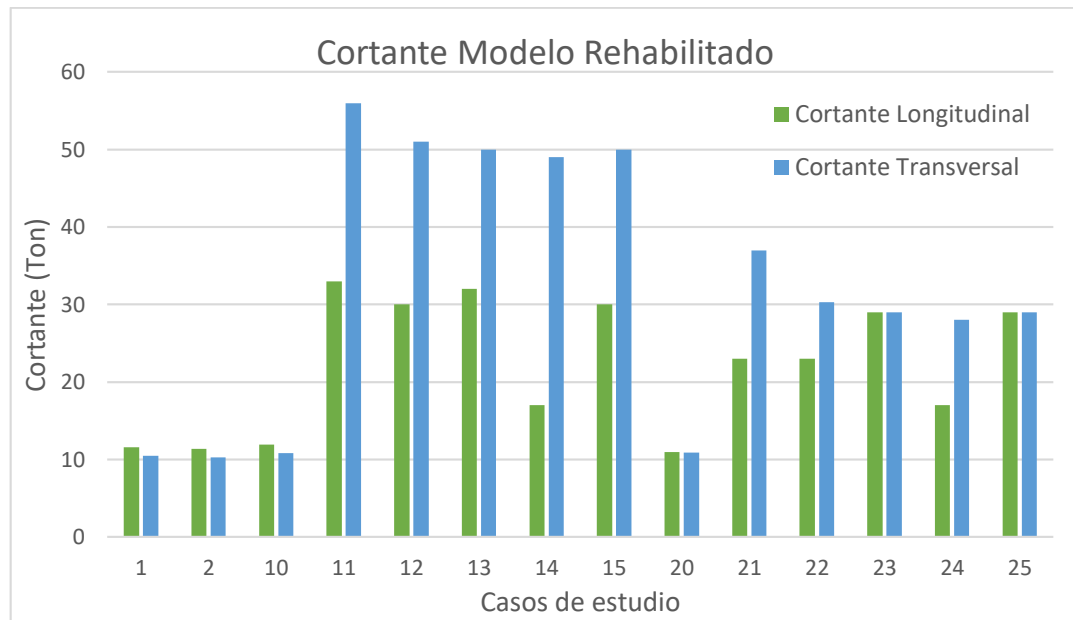


Figura 44. Cortante transversal y longitudinal de los modelos rehabilitados.

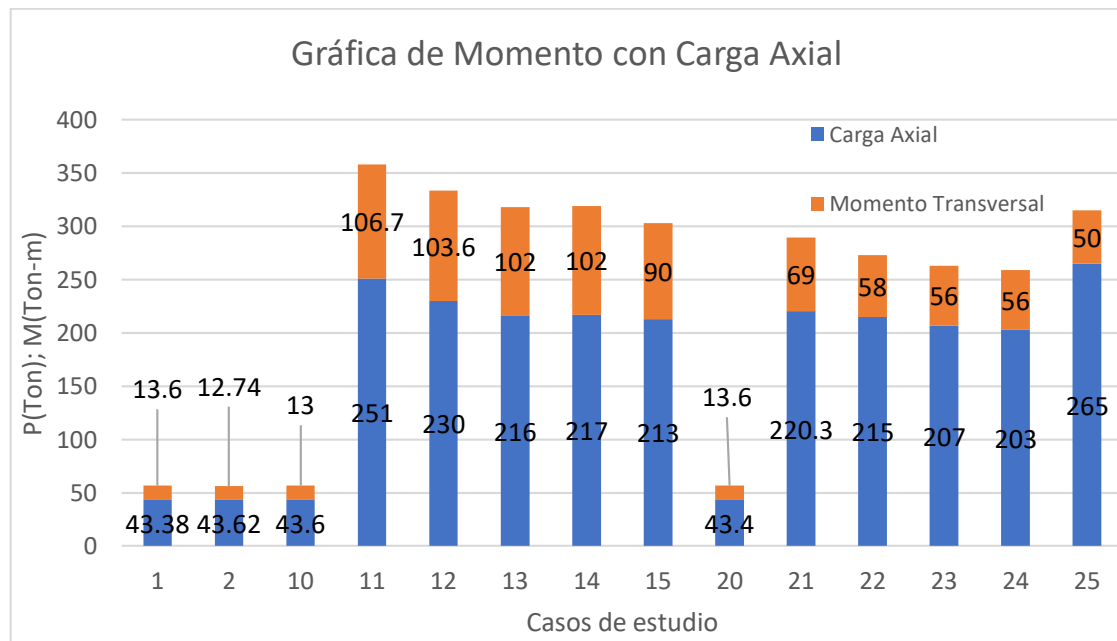


Figura 45. Combinación de momento y carga axial.



Con la combinación de momento y carga axial que se ve en la figura 45 se observa un comportamiento similar al cortante y carga axial, momentos 7 veces mayores en promedio en los modelos 11 a 15 con respecto a los modelos 1 a 2, los cuales además de tener un espectro diferente por el cambio de propiedades dinámicas, la principal variable es el cambio de uso de diagonales en lugar de placas.

Las distorsiones, desplazamientos, periodos y elementos mecánicos presentaron un comportamiento similar al del modelo original. Excepto en los modelos que usan diagonales equivalentes los cuales son más flexibles. Para analizar más directamente las diferencias entre los modelos originales y rehabilitados se hará una comparación de refuerzo.

### 6.2 COMPARACIÓN DE REFUERZO

Una de las partes más importantes del estudio que se realiza, es analizar el efecto del refuerzo del edificio y determinar de qué manera afecta o influye sobre las propiedades dinámicas, elementos mecánicos y comportamiento general del edificio; para repasar el refuerzo que fue utilizado conviene revisar el apartado 4.3.

#### 6.2.1 Periodos

En el mismo orden que se revisaron los modelos por separado se verá su comparación, empezando por los modos de vibrar en este caso se analiza el primer modo de vibrar, y como se aprecia en la figura 46, los periodos de los modelos rehabilitados son 7% menores en promedio que los de los modelos originales, los modos 2 y 3 son 16% y 25% menores respectivamente en los modelos rehabilitados.

La figura 20 que se muestra en el apartado 5.2.1 muestra que esta variación en periodos tampoco representa un cambio considerable en las aceleraciones de los espectros utilizados.



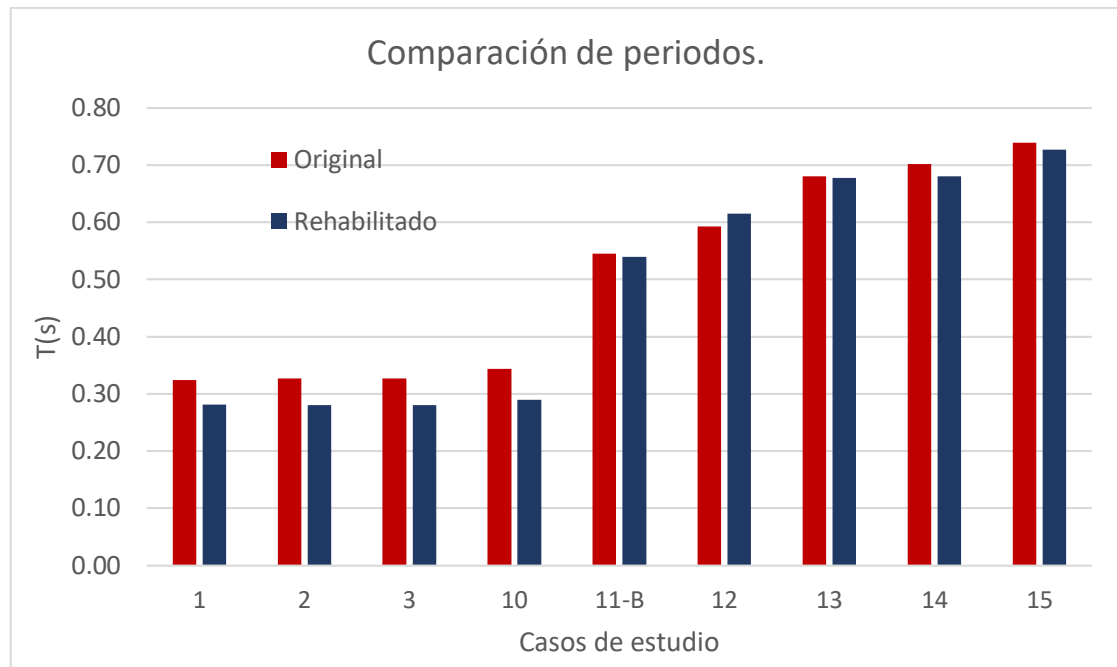


Figura 46. Comparación entre periodos de los modelos originales con los modelos rehabilitados.

### 6.2.2 Desplazamientos y distorsiones

En la figura 47 se comparan las distorsiones longitudinales de ambos modelos, las líneas punteadas representan los modelos originales y las líneas verticales amarilla y roja representan el límite máximo por servicio (0.002) y por colapso (0.005) respectivamente.

En la gráfica se observan varias cosas interesantes, primeramente, aunque se obtiene una reducción en promedio del 19% de las distorsiones, cada caso se mantiene en el área de servicio o colapso que estaba en los modelos originales. Otro cambio importante se ve con la curvatura de las gráficas donde en los modelos originales el nivel más débil es el 1ro y en los modelos rehabilitados es el 3er nivel, esto como ya lo habíamos mencionado se asocia con la incorporación de vigas de acero en las discontinuidades de las escaleras.

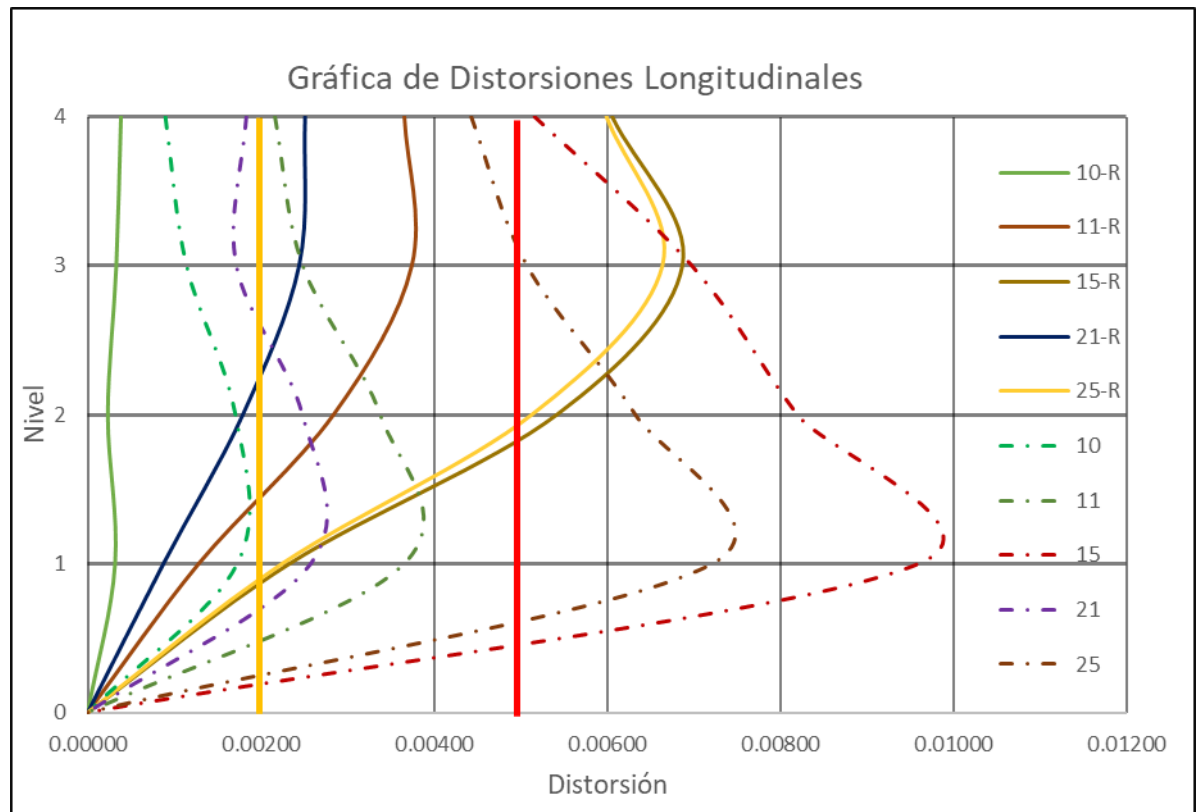


Figura 47. Gráfica que compara las distorsiones longitudinales de los modelos rehabilitados y los modelos originales.

Para las distorsiones transversales que se ven en la figura 48 no se ve un comportamiento uniforme, ya que los modelos que usan placas como el modelo 10 tienen una reducción en promedio del 10%, pero los modelos con diagonales presentan un comportamiento diferente ya que en algunos modelos como el 15, las distorsiones obtenidas con el modelo rehabilitado son mayores e incluso pasan el límite por colapso.

Este comportamiento se asocia a que la mayoría del refuerzo como los cables postensados y las vigas de acero se colocaron en dirección longitudinal.

Por último, aunque gráficamente no se puede observar, los modelos 1 y 2 rehabilitados presentan un comportamiento diferente ya que la curva en lugar de “C” invertida que es el comportamiento normal que han mostrados todos los modelos, forma una “S” debido a que la baja demanda sísmica en el modelo con cables parece generar un

movimiento más uniforme en la estructura y se acentúa el comportamiento no lineal del cable al tener una baja fuerza de tensión.

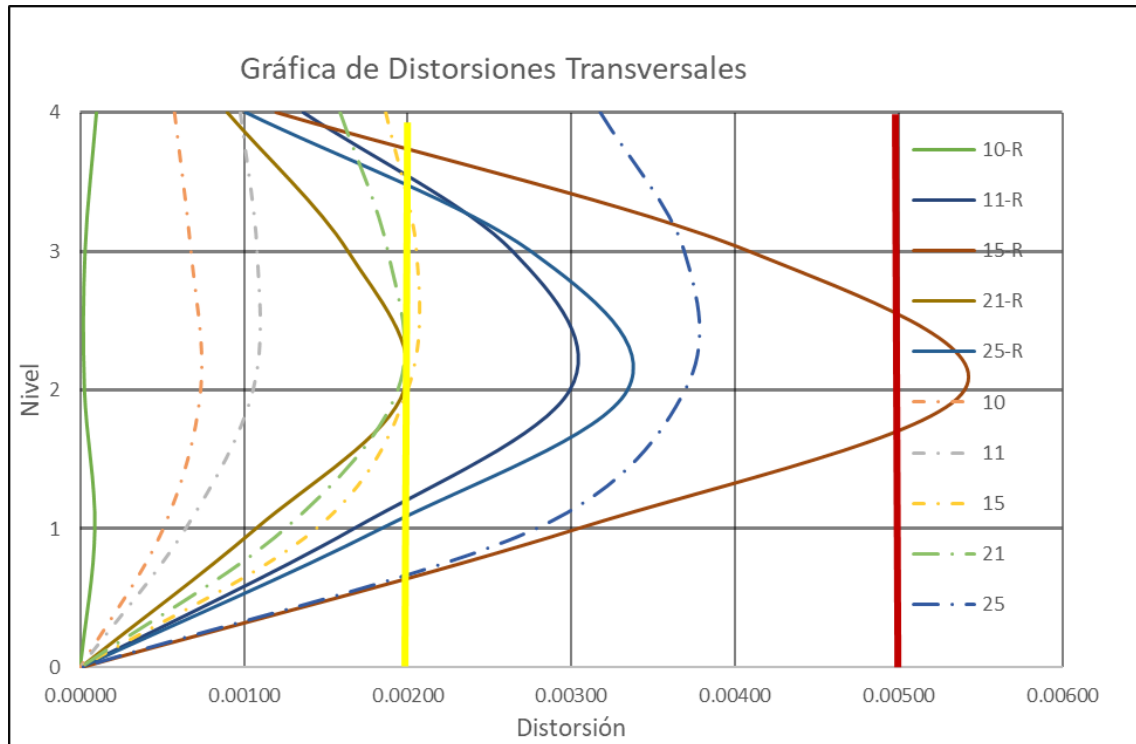


Figura 48. Gráfica que compara las distorsiones transversales de los modelos originales con los modelos rehabilitados.

Las deformaciones van muy ligadas a las distorsiones, por lo que es importante hacer la comparación a la par, en la figura 49 se ven las deformaciones máximas en dirección longitudinal para ambos casos.

Se tiene que los modelos rehabilitados tienen una reducción promedio del 15% de deformación; por su parte, los modelos 10 y 20 que son modelos con placas se reducen en un 8.5%; en tanto los rehabilitados son más estables ya que como vemos el modelo 15 y 25 originales presentan una diferencia de 25 mm ante el aumento de la demanda sísmica y los mismos modelos rehabilitados tienen una diferencia de 1 mm; también se aprecia que los modelos rehabilitados se ven menos afectados por las diferencias de inercia producto de los distintos reglamentos ya que los modelos 11 a 15 originales tienen una diferencia de 51 mm y los mismos modelos rehabilitados tienen una diferencia de 28 mm; lo que significa que el



uso de cables y vigas aporta una estabilidad considerable en dirección longitudinal ante los cambios de inercia y demanda sísmica.

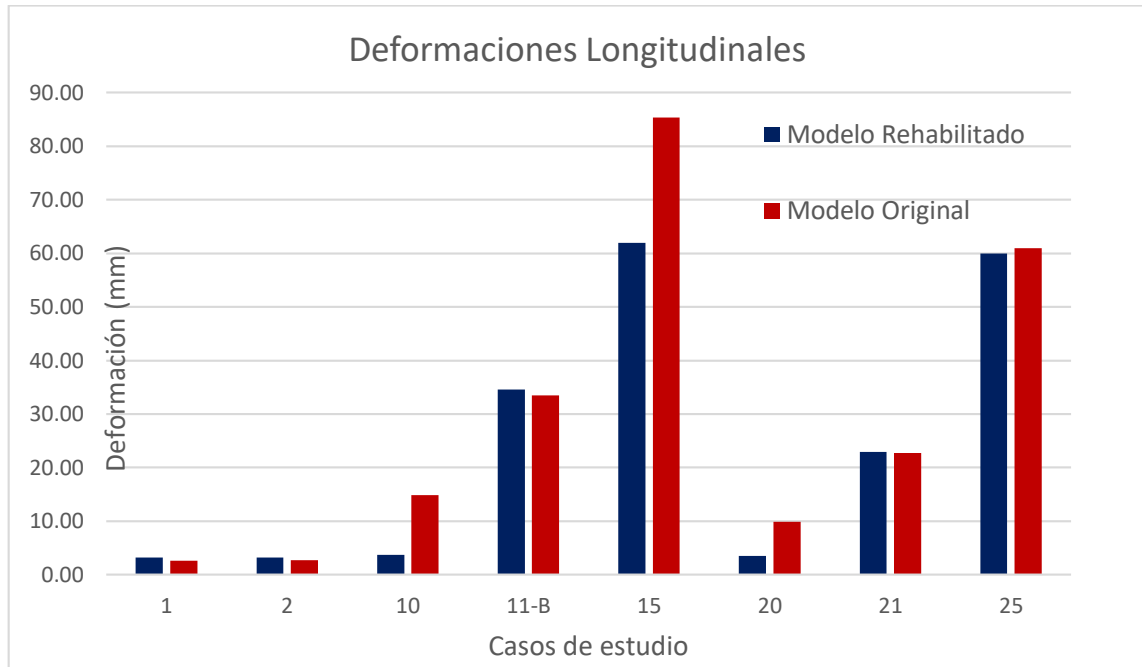


Figura 49. Comparación de las deformaciones longitudinales máximas entre modelos originales y rehabilitados.

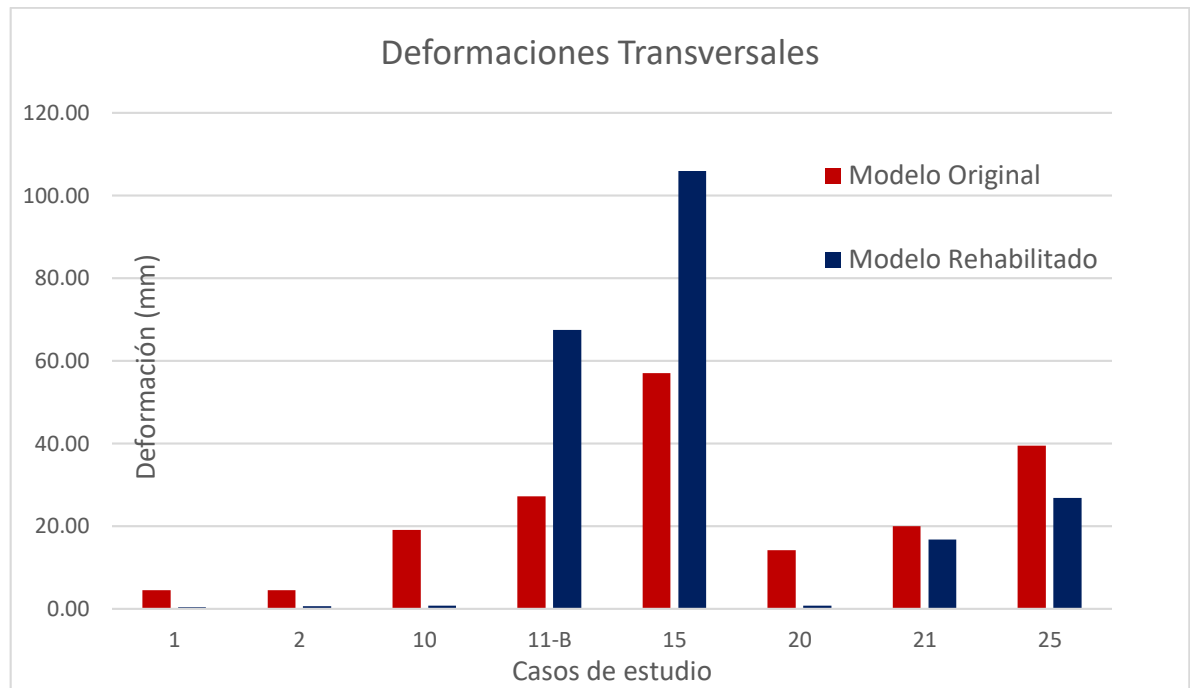


Figura 50. Comparación de las deformaciones transversales máximas entre modelos originales y rehabilitados.

En la dirección transversal (Ver Fig. 50) del edificio también se observan comportamientos interesantes, primeramente, los modelos con placas rehabilitados tienen deformaciones 93% menores que los originales las cuales son prácticamente 0; y se observa que se vuelve más sensible al incremento de demanda sísmica ya que en los modelos 11 a 15 rehabilitados las deformaciones son el doble a las de los modelos originales. La diferencia entre el comportamiento en ambas direcciones se asocia a que el refuerzo principal fue colocado en los ejes en la dirección longitudinal en tanto en la dirección transversal únicamente fueron reforzados los muros dañados, lo que genera una dirección más fuerte que otra y que conlleva a concentrar el daño en la dirección débil; además sabemos que la incorporación de diagonales produce mayor flexibilidad en el edificio lo que incrementa las deformaciones transversales.



### 6.2.3 Elementos Mecánicos.

Por último, parte importante de la rehabilitación y el refuerzo es lograr la reducción de los elementos mecánicos que pueden generar daños en los elementos estructurales, así como aumentar su resistencia ante los mismos.

Como se sabía de antemano, la incorporación de cables iba a generar un incremento en la carga axial por lo que se decidió colocar ángulos y placas de acero en las columnas, pero para ver el efecto que el refuerzo generó en el cortante y momentos se hará su comparación.

En cuanto a la carga axial (Ver Fig. 51), los modelos con placas (1,2,10 y 20) tienen una reducción promedio del 11%, pero los modelo 11,12,13,15,21,22,23 y 25 tienen un incremento promedio del 18%; Aunque esta configuración no presenta un incremento tan grande ya que en el caso más crítico se llegar al 47% de la resistencia máxima, el efecto de una mayor tensión, o diámetros de los cables se analizará en el siguiente subcapítulo.



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

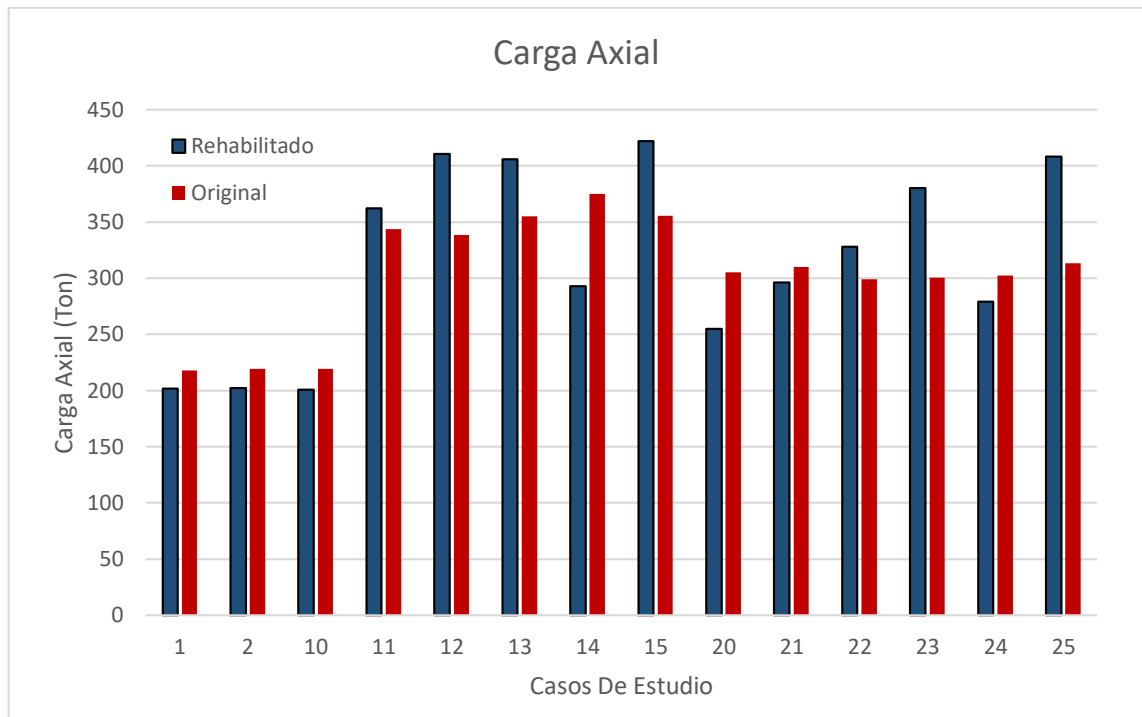


Figura 51. Comparación de la carga axial máxima de los modelos rehabilitados y originales.

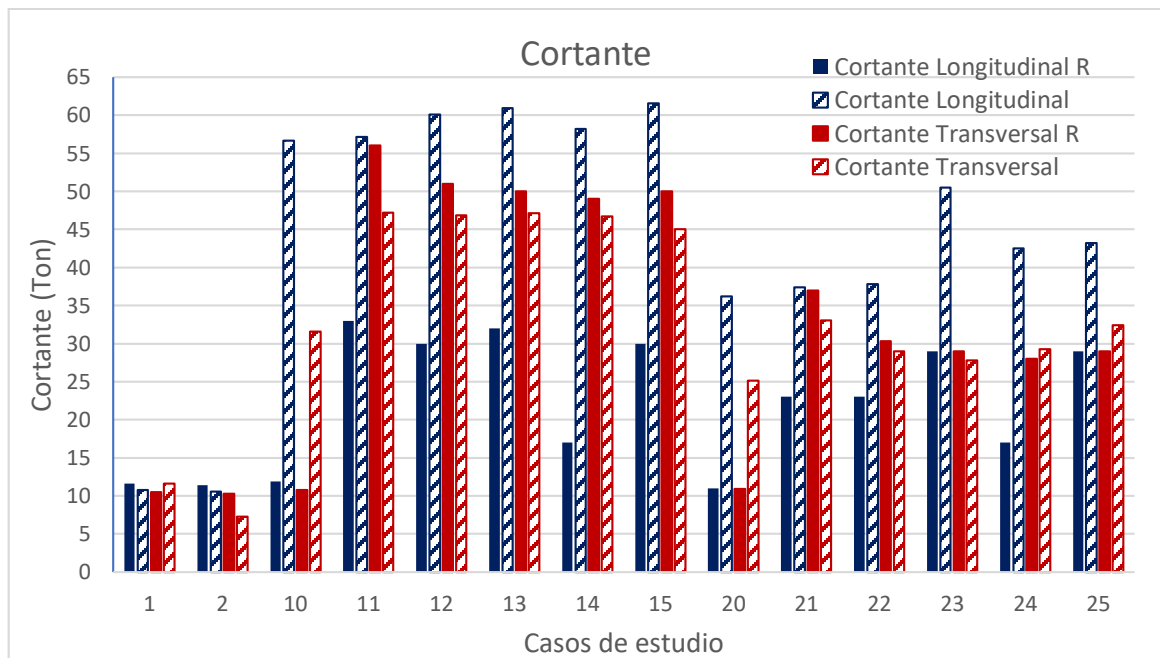


Figura 52. Comparación del cortante transversal y longitudinal entre los modelos rehabilitados y originales

\*La R indica rehabilitado.



El cortante es un elemento agresivo, capaz de generar un daño considerable en los diferentes elementos estructurales, el cortante tiende a incrementarse considerablemente ante el aumento en las demandas sísmicas, por lo que el refuerzo debe ser capaz de soportarlo y reducirlo. En la figura 52 se observa la comparación entre cortantes en donde se muestra que el cortante en dirección longitudinal disminuye considerablemente, un 52% en promedio; también los modelos rehabilitados muestran una mayor estabilidad ante el incremento de la demanda sísmica ya que entre los modelos con 10 a 15 y 20 a 25 hay una diferencia del 12% y los mismos modelos sin rehabilitar tienen una diferencia de cortante del 30%.

El cortante en dirección transversal presenta un comportamiento diferente, los modelos con placa presentan una reducción en promedio del 61% y los modelos con diagonales tienen un incremento del 7%; la estabilidad con respecto al aumento de carga sísmica no presenta un cambio considerable. Un comportamiento parecido se vio en las deformaciones transversales y como se mencionó, esto se asocia con el hecho de que el refuerzo principal se colocó en dirección longitudinal lo que empieza a generar conclusiones importantes sobre la decisión de concentrar el refuerzo en una sola dirección.

Por último, la combinación de momento longitudinal con carga axial (Ver Fig.53), se muestra un incremento general de momento y carga axial, el momento incrementa un 13% en los modelos con diagonales y se reduce un 78% en los modelos con placas, un comportamiento similar a la dirección transversal. Para el caso del momento se esperaba un incremento en la carga axial pero una reducción en el momento, y aunque el incremento es pequeño no era el comportamiento esperado.

De manera general podemos concluir, que la respuesta a la implementación del refuerzo es muy variable, el sentido longitudinal de manera general se comporta de buena manera presentando una reducción en los desplazamientos, distorsiones y cortante para todos los casos, tanto en la reducción de dichos elementos, como en la estabilidad ante el incremento en la carga sísmica. La dirección transversal, por su parte presenta un buen comportamiento en los modelos con placas los cuales tienen reducción en las distorsiones,





deformaciones y cortante, sin embargo, al pasar a modelos más flexibles con diagonales se presentan incrementos considerables de los mismos elementos.

Los que nos lleva a la conclusión de que el refuerzo en sentido longitudinal funciona adecuadamente, pero la falta de refuerzo transversal ocasiona que sea la dirección más débil y concentre mayor cantidad de daño. Se considera que el proyecto de refuerzo debió incrementar también la resistencia y/o rigidez del edificio en la dirección transversal.

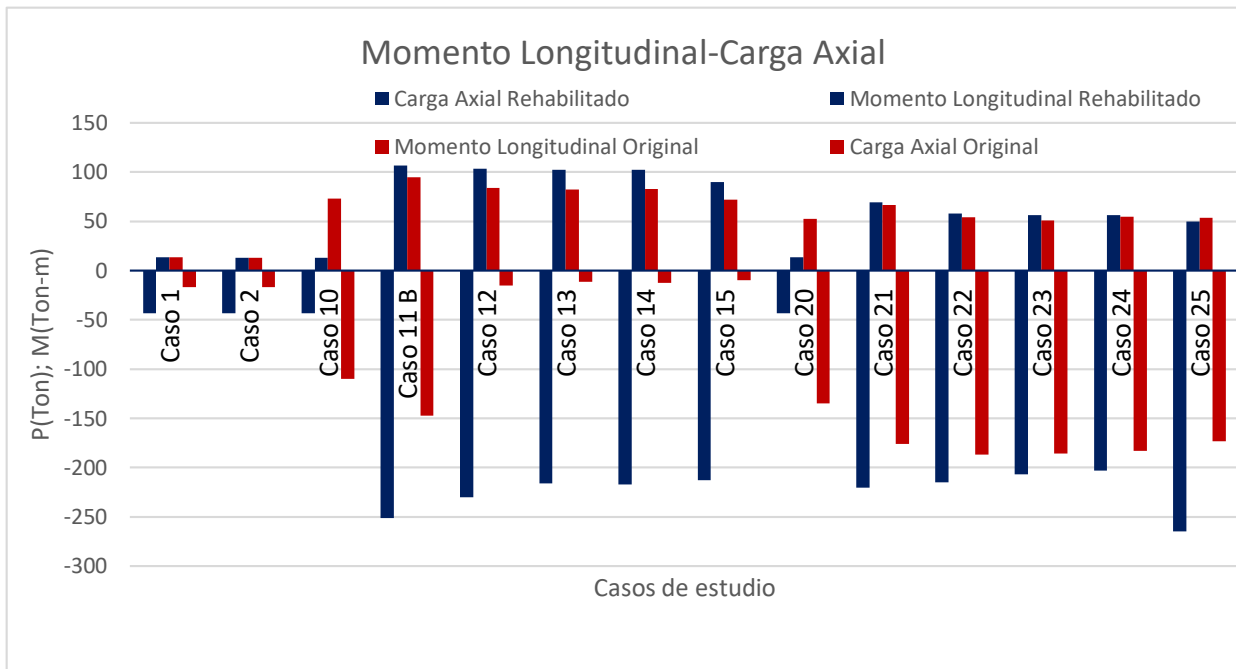


Figura 53. Comparación de la combinación momento longitudinal-carga axial entre modelos rehabilitados y originales.



### 6.3 CAMBIO EN EL DIÁMETRO DE LOS CABLES.

Una vez que hemos visto la manera en la que cada variable afecta el comportamiento del edificio y la diferencia que existe entre el modelo rehabilitado y original, vamos a analizar por último la forma en la que el cambio en los cables afecta al edificio.

Cabe recordar que los cables son de un acero de alta resistencia de  $19\,000\text{ kg/cm}^2$ , y que fueron tensados al 10% de su capacidad para prevenir la flecha o catenaria del cable, el cable propuesto en los modelos fue de 2 pulgadas. Y se hicieron modelos con 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 14 y 18 pulgadas para analizar el efecto del diámetro del cable en la respuesta del edificio.

A demás como se analizó antes, la interferencia de los cables varía de acuerdo a la flexibilidad del edificio, por lo que se hizo el análisis en los modelos 10 y 15 para hacer la comparativa.

Los resultados obtenidos fueron bastante interesantes, ya que se aprecia la clara influencia del cambio de diámetro en los cables, y se presentan a continuación:

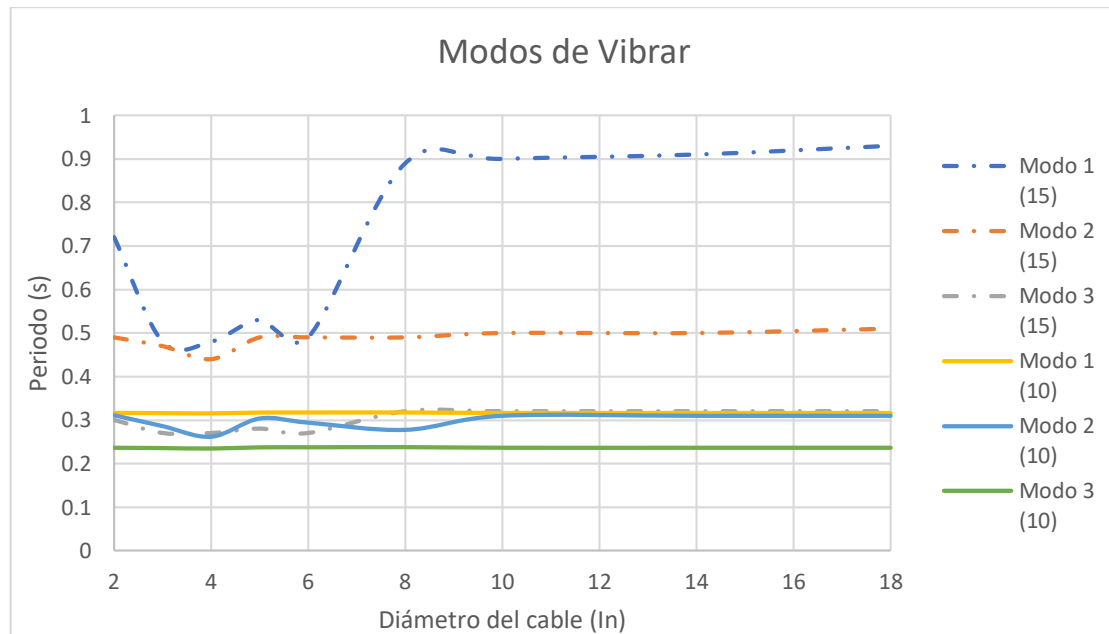


Figura 54. Cambios en los modos de vibrar en función del diámetro en los cables.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



En los periodos (Ver Fig.54) del modelo 10, la variación en el diámetro no genera ninguna afectación en los modos. Sin embargo, en el modelo 15 se presenta primero una reducción en el modo 1 del 33% al pasar de 2 pulgadas a 3 pulgadas y se mantiene igual hasta 6 pulgadas; esta reducción en el periodo genera una disminución del 16% de las aceleraciones de acuerdo al espectro obtenido del SASID.

En el cambio de 6 a 8 pulgadas, se presenta un incremento del 81% pasando de un periodo de 0.5 a 0.9, este incremento representa un aumento del 6% de las aceleraciones de acuerdo al espectro del SASID, dicha configuración se mantiene estable hasta las 18 pulgadas.

Otro aspecto importante a analizar que no puede ser observado gráficamente es el cambio de dirección de modos entre modelos. En todos los modelos originales y rehabilitados, el modo 1 corresponde a la dirección longitudinal, el modo 2 a la dirección transversal y el modo 3 es en torsión; con el cambio en el diámetro de los cables a 3 y 4 pulgadas el modo 1 es el de dirección transversal y el 2 longitudinal, a partir del modelo con 5 pulgadas en adelante la configuración vuelve a ser la inicial, lo que nos indica que se puede presentar un reacomodo de fuerzas debido a los cambios de rigidez provocados por el cambio de diámetro.

En las distorsiones longitudinales (Ver Fig. 55), se observa que el cambio en el diámetro no genera ningún cambio en las distorsiones, la diferencia que se aprecia es la que se produce por las inercias entre los modelos 10 y 15. Las distorsiones en dirección transversal (Ver Fig. 56), tienen un comportamiento diferente, en el modelo 10 no se presenta ninguna variación, pero el modelo 15 al pasar de 2 a 3,4,5 y 6 pulgadas tiene una disminución promedio del 41% , y al utilizar diámetros de 8 hasta 18 pulgadas, las distorsiones incrementan un 100% en promedio con respecto al cable de 2 pulgadas.

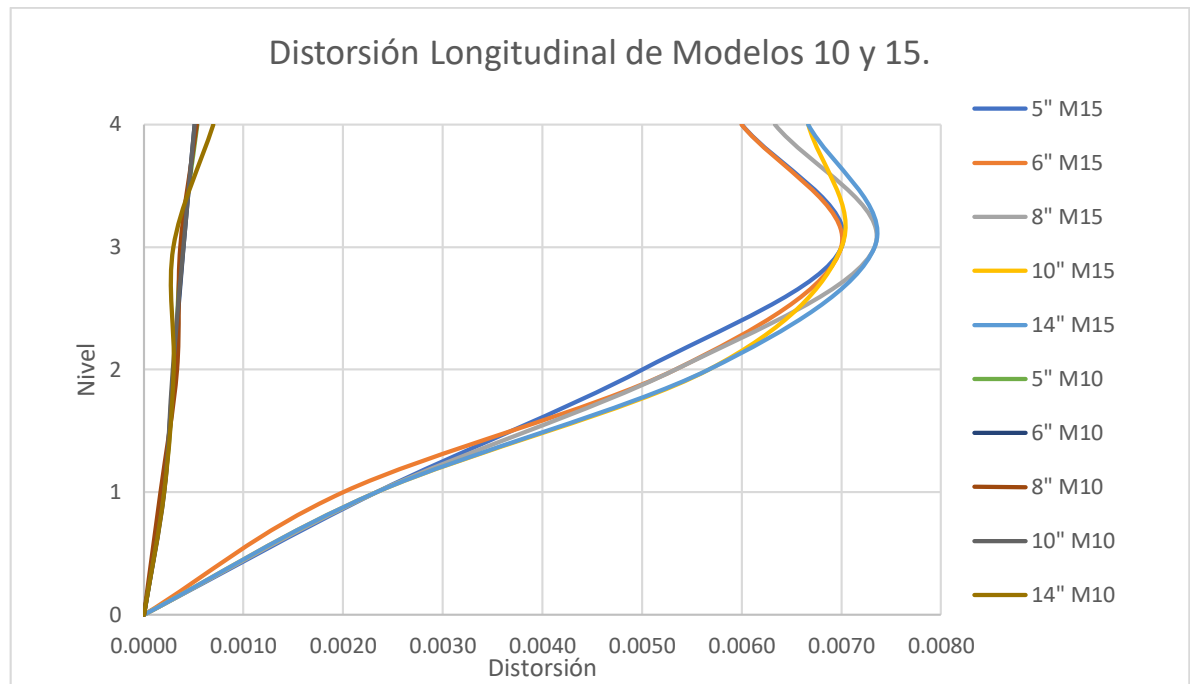


Figura 55. Variación de las distorsiones longitudinales en los modelos 10 y 15 con el cambio de diámetro en los cables.

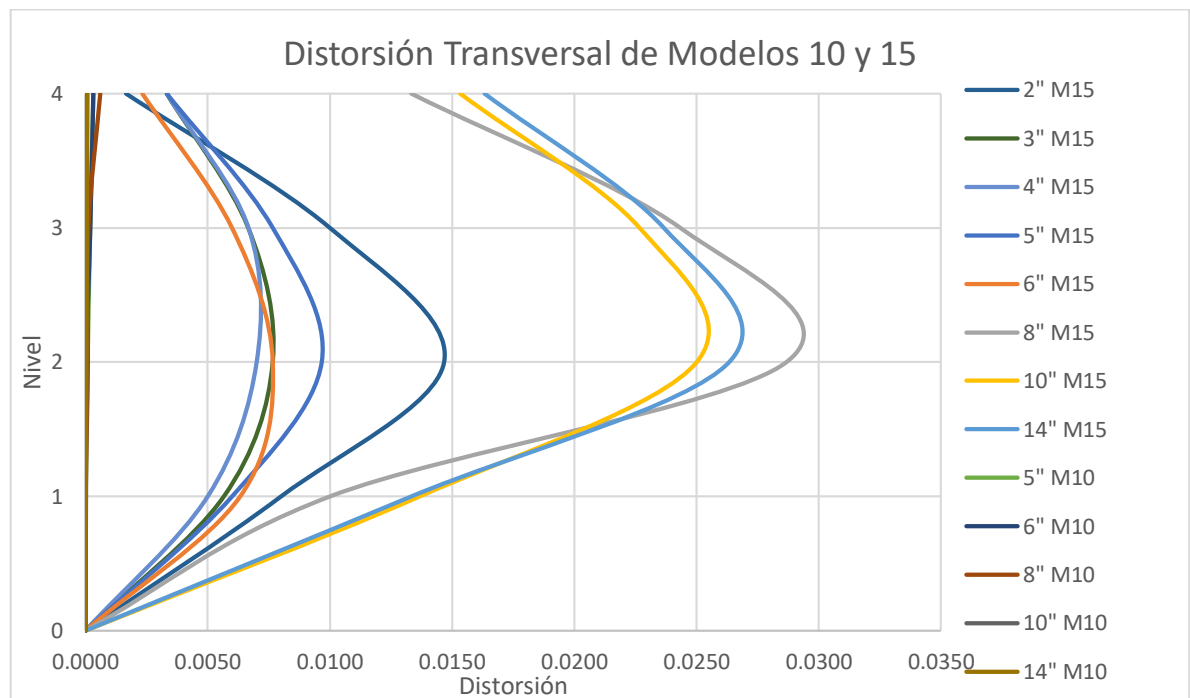


Figura 56. Variación de las distorsiones transversales en los modelos 10 y 15 con el cambio de diámetro en los cables.



Por último, se revisa el comportamiento de los elementos mecánicos ante el cambio de diámetros, tanto el cortante como el momento (Ver Fig.57 y Fig.58 respectivamente), tienen un comportamiento similar, en ambos casos el modelo 10 no presenta ninguna variación ni en dirección longitudinal ni transversal, en tanto el modelo 15 no presenta variaciones en dirección longitudinal pero en dirección transversal se tienen variaciones interesantes; en el caso propio del cortante al pasar de 2 pulgadas a 3, 4 5 y 6 pulgadas se tiene una reducción del 28% en promedio, y al pasar de 6 a 8 pulgadas se incrementa el cortante 122% entre 8 y 18 pulgadas se tiene un ligero incremento del 5% ; el momento tiene igualmente una reducción del 31% al pasar de 2 a 3,4,5 y 6 pulgadas y un incremento del 115% al pasar de 6 a 8 pulgadas y de 8 a 18 pulgadas se tiene un ligero incremento del 4%.

Esta reducción tanto de cortante como de momento, se puede asociar a 2 factores, al aumento de rigidez producto del incremento de diámetro o a la reducción de aceleraciones que generó la disminución de periodos vistos en la figura 54. Como se analizó en la comparación entre modelos rehabilitados y sin rehabilitar, el cortante tendía a aumentar un 7% en el modelo 15 rehabilitado, por lo que el uso de cables entre 3 y 6 pulgadas puede ser una buena opción para revertir el incremento.

Sin embargo, hay un último factor importante a analizar antes de considerar aumentar el diámetro de los cables, y es el incremento de la carga axial, en la figura 59 se observa que, ante el aumento de diámetro, la carga axial tiende a incrementar, para el modelo 15 se presenta una ligera reducción del 4% al pasar de 2 a 4 pulgadas e incrementa un 19% en las 18 pulgadas; el modelo 10 se mantiene igual de 2 a 4 pulgadas e incrementan un 37% al usar 18 pulgadas.

Con base en los resultados analizados, se observa que el uso de diámetros de 3 y 4 pulgadas genera una reducción de cortante y momento en dirección transversal para el modelo 15, e igualmente una ligera disminución en las distorsiones en la misma dirección, en cuanto a la carga axial no representan ningún incremento. En lo que sigue se investigará si el cambio en el porcentaje de tensión inicial del cable genera un efecto en el edificio.



# USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS

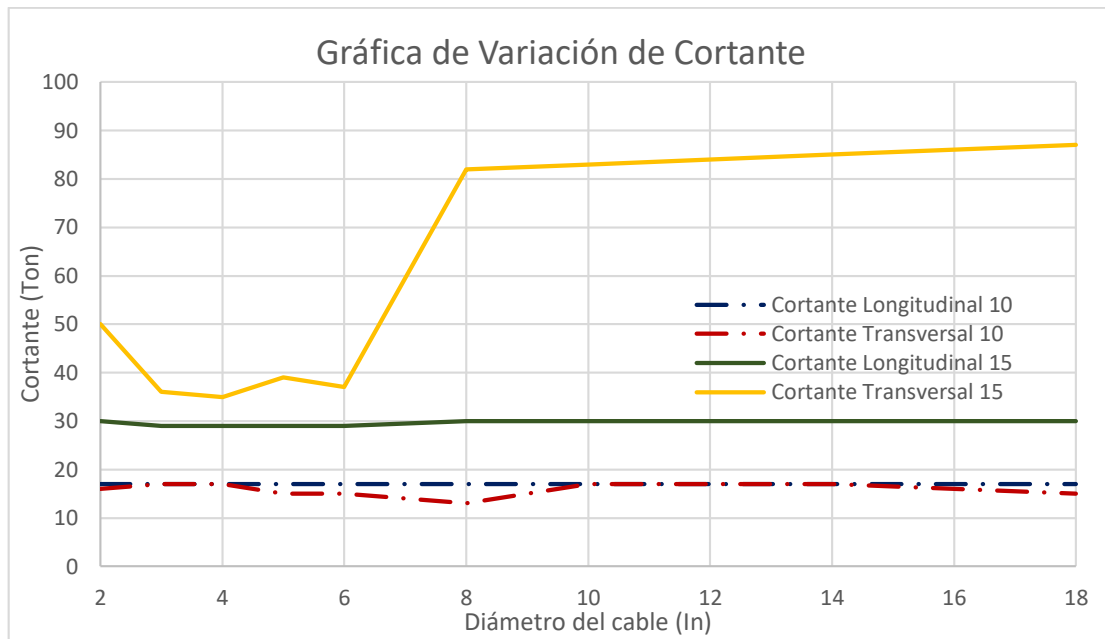


Figura 57. Gráfica de variación de cortante con el cambio de diámetro en los cables.

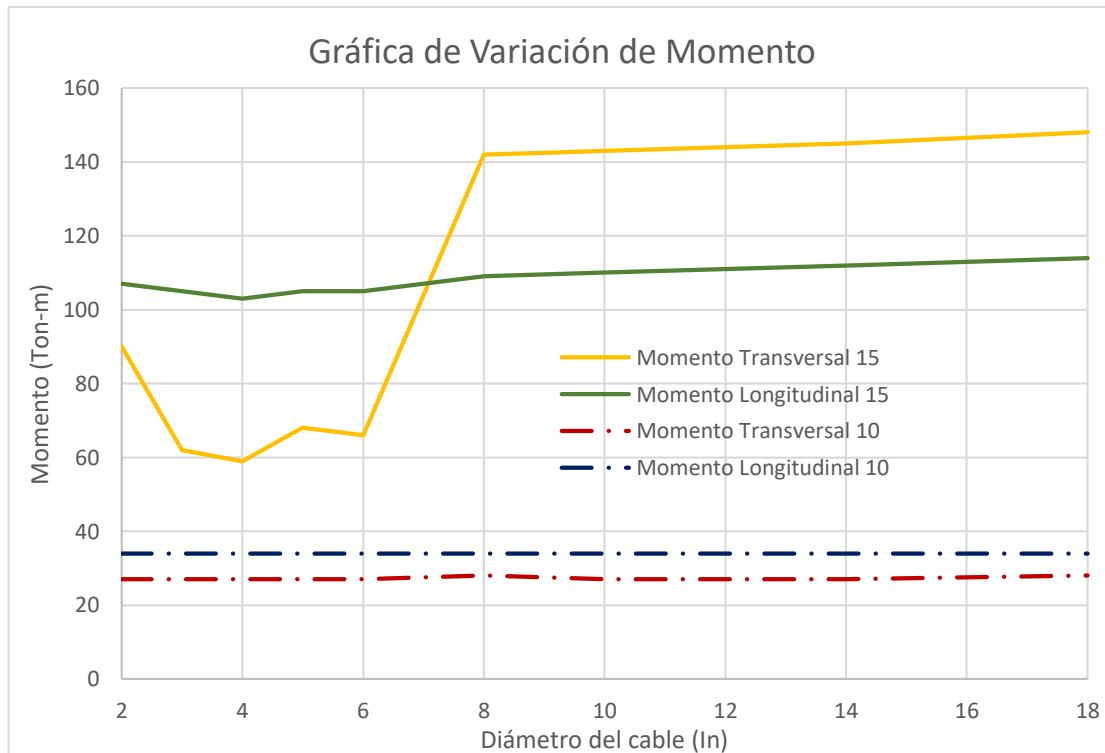


Figura 58. Gráfica de variación de momento con el cambio de diámetro en los cables.

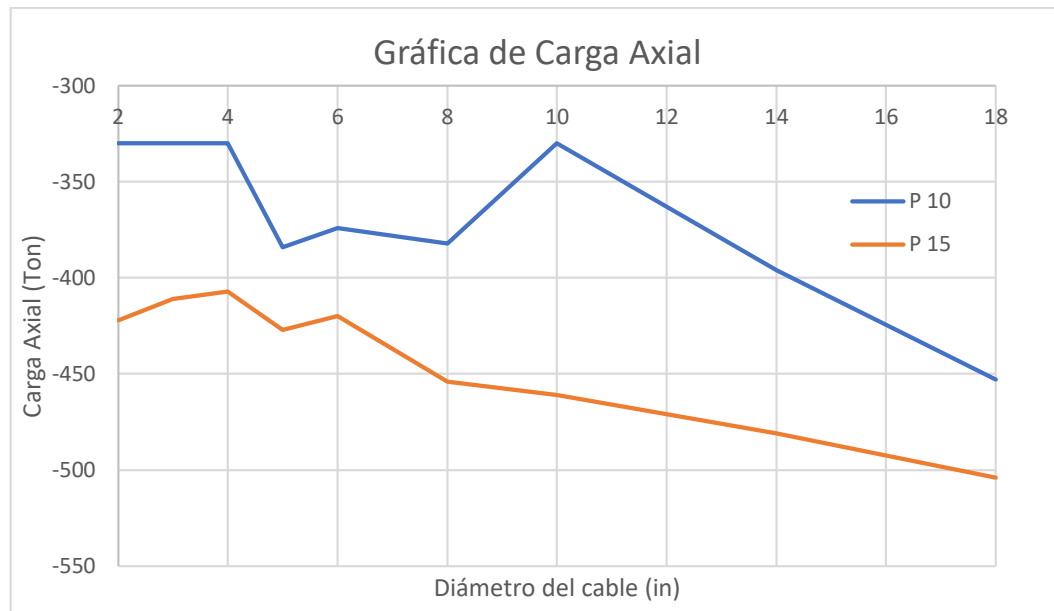


Figura 59. Variación de la carga axial ante el cambio de diámetro en los cables.

### 6.3.1 Efecto de los cables ante variaciones en la demanda sísmica.

En el apartado 5.3.1, se observó que el incremento en la demanda sísmica producto de utilizar diferentes espectros genera variaciones importantes en los elementos mecánicos, los cuales van creciendo conforme se incrementa la intensidad, en algunos casos, la variación es importante, ya que como sabemos las magnitudes de los sismos nos son predecibles por lo que analizar la estabilidad que los cables puedan proporcionar al edificio resulta imperativo.

Para este análisis se utilizan los modelos 15 y 25 que tienen la misma configuración, pero diferentes espectros, el modelo 15 utiliza espectro del SASID y el modelo 25 utiliza un registro de la estación GC38; para el periodo de ambos modelos el cual es 0.73, el modelo 15 tiene aceleraciones 24% mayores en dirección longitudinal y 43% mayores en dirección transversal.

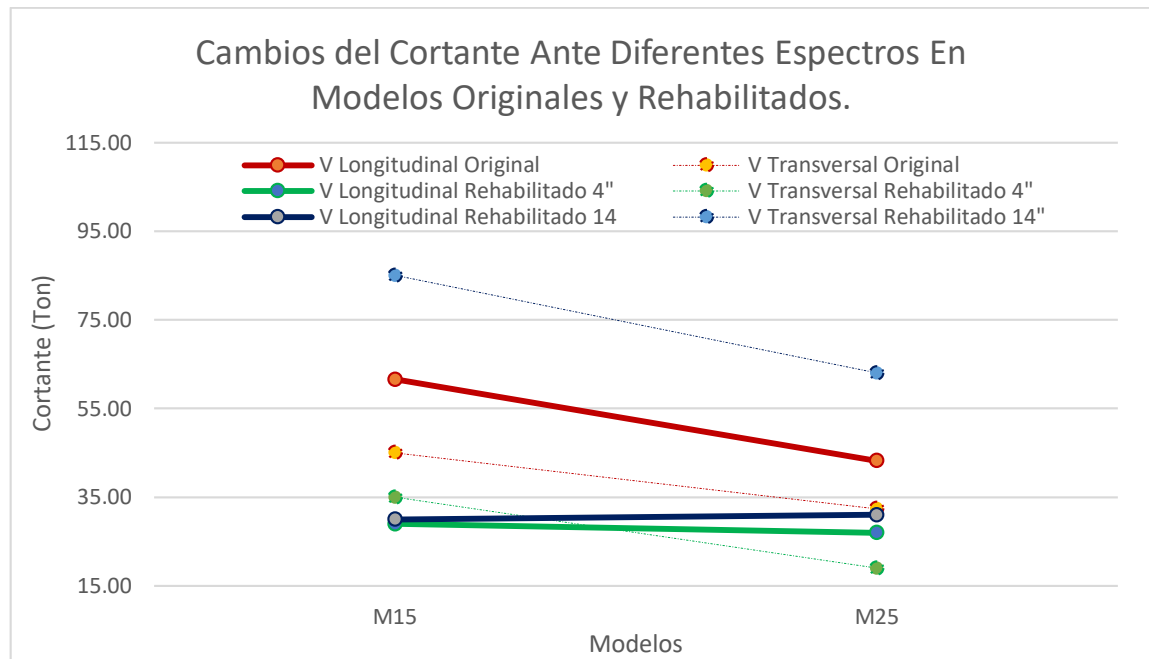


Figura 60. Análisis de la variación de cortante entre modelos originales y rehabilitados ante diferentes demandas sísmicas.

En la figura 60 se observan como punto de partida las líneas rojas, las cuales representan el cortante original en ambas direcciones como era evidente al pasar del modelo 15 al 25 se espera una reducción de cortante debido a la reducción de las aceleraciones.

En dirección longitudinal el modelo original tiene una diferencia de 30 % entre los modelos 15 y 25, el modelo con 4'' tiene una diferencia del 7% y el modelo con 14'' una diferencia del 3%; en dirección transversal el modelo original tiene una diferencia del 28%, el modelo con 4'' tiene una diferencia de 46% y el modelo con 14'' una diferencia de 26%.

Con la variación de momento (Fig. 61) ocurre algo similar, para la dirección longitudinal el modelo original tiene una variación de 25%, el modelo con 4'' una variación del 10% y el modelo de 14'' una variación del 2%; en dirección transversal los modelos originales tienen una variación del 10%, en el modelo con 4'' 49% y en el modelo con 14'' 26%.

De esto, podemos concluir que en dirección longitudinal el uso de los cables de refuerzo ayuda a que las variaciones en cortante y momento sean menores ante la variación





de aceleraciones producto de diferentes espectros lo cual nos es beneficioso ante la incertidumbre sísmica ya que no sabemos la magnitud del sismo que pueda presentarse.

Pero en dirección transversal, el edificio tiene un comportamiento muy variable, ya que puede presentar disminución o un incremento considerable tanto en el cortante o en el momento, como ya se había visto en los casos anteriores, se presenta un mejor comportamiento en dirección longitudinal y por el contrario la dirección transversal se ve inclusive afectada.

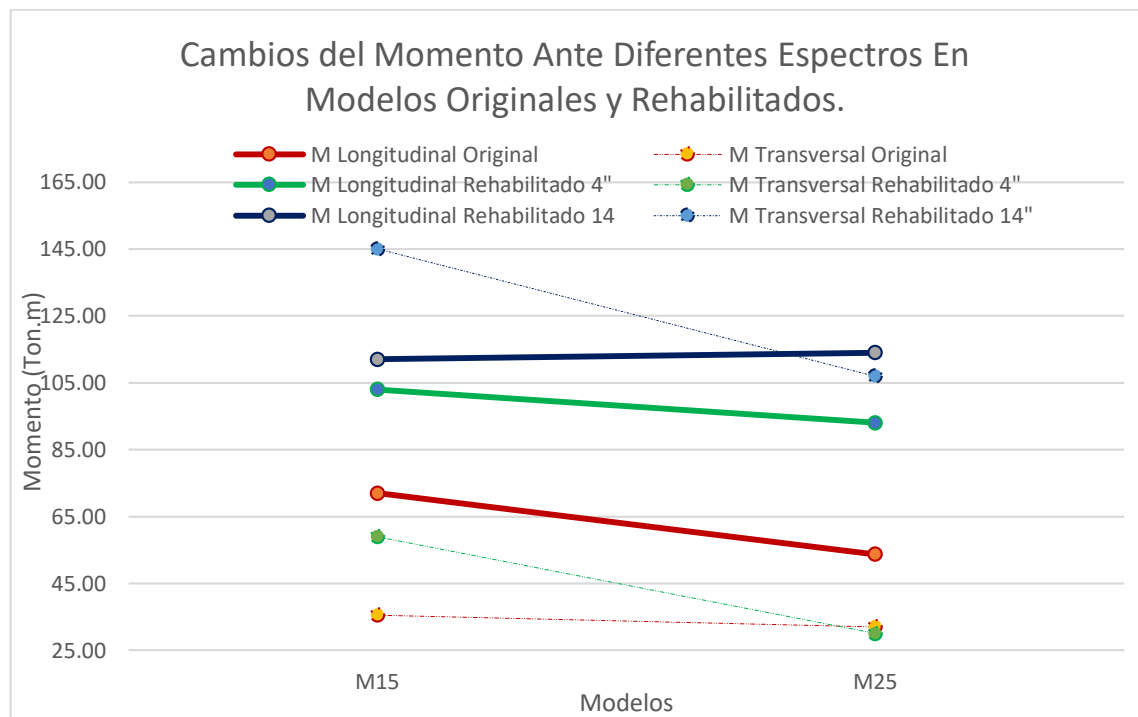


Figura 61. Análisis de la variación de momento entre modelos originales y rehabilitados ante diferentes demandas sísmicas.

En un panorama general, la figura 62 muestra el comportamiento del cortante y momento en ambas direcciones ante el cambio en la intensidad de las aceleraciones producto del uso de diferentes espectros y de factores para incrementar la aceleración. Las líneas rectas representan los modelos con 4" de diámetro en tanto las líneas punteadas son modelos con 14", en todos los casos el uso de diámetros mayores muestra un incremento en los elementos



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



mecánicos, como ya se había observado. Ahora en el caso del uso de cables de 4" o 14" ante el incremento del 75% en las aceleraciones producto del registro de la estación GC38, vemos que el cortante en ambas direcciones con 4" tiene un incremento del 53% y el momento incrementa en 68% en promedio en ambas direcciones; en tanto el uso de cable de 14" da una variación del cortante longitudinal del 52% y transversal del 70%, y el momento en ambas direcciones incrementa 71% en promedio, es decir que el cortante en dirección longitudinal presenta incrementos menores en el uso de cables de mayor diámetro y se mantiene más estable ante el incremento de aceleraciones en cualquiera de los 2 casos, el resto de los elementos muestra un incremento en magnitud al usar cables de mayor diámetro y una mayor variación ante el incremento de la demanda sísmica.

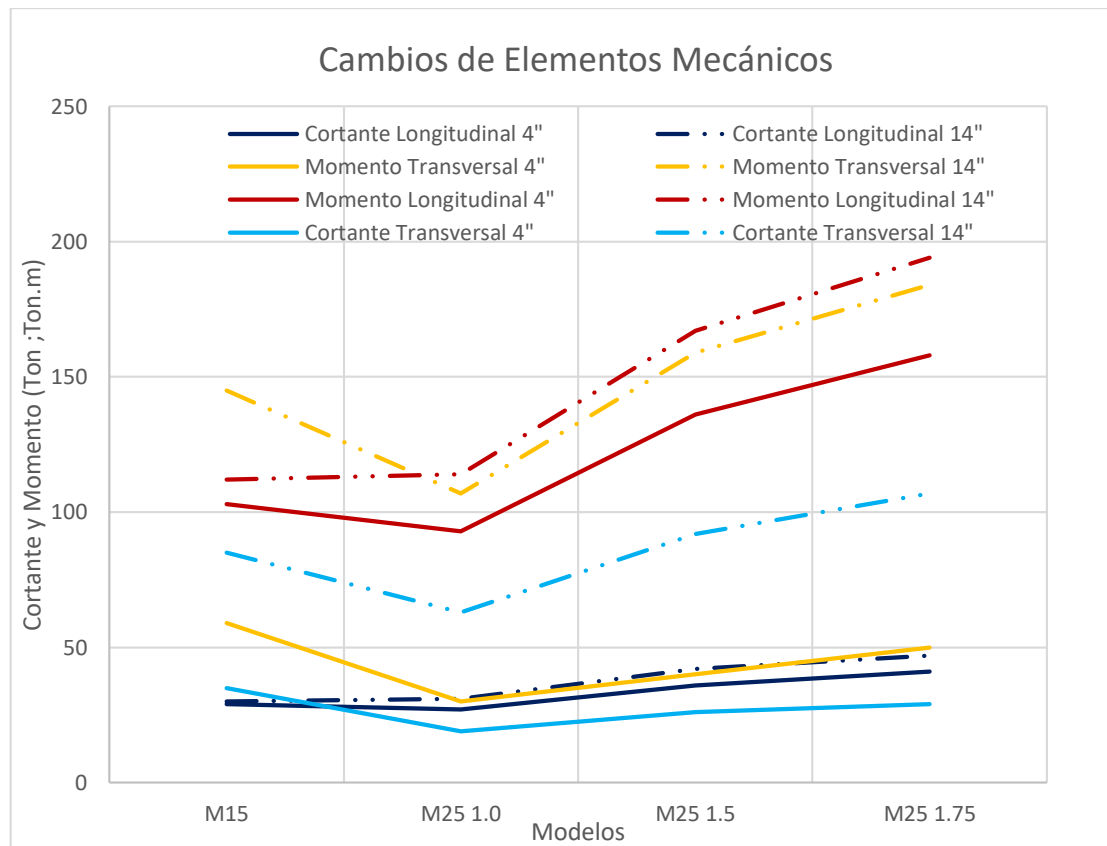


Figura 62. Variación de elementos mecánicos con el uso de cables de 4 y 14 pulgadas, ante el incremento en la demanda sísmica.



## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Se estudió un edificio que tuvo daños durante el sismo de 1985 y que fue reforzado con cables. Se realizaron varios modelos bajo distintas consideraciones de análisis que incluyen cambios en la configuración del modelado de muros; usos de factores de reducción de inercia de los elementos de acuerdo con diferentes códigos de diseño; uso de espectros de diseño y espectros de respuesta de registros sísmicos diferentes; y el cambio en las propiedades de los materiales. El trabajo se desarrolló en tres etapas: el edificio original, el edificio reforzado, y el efecto del cambio de las características de los cables.

En todos los casos se analizó el efecto que cada cambio producía en sus propiedades dinámicas, elementos mecánicos, desplazamientos, distorsiones y su comportamiento general. Esto nos lleva a hacernos diferentes preguntas como ¿Qué influencia tienen los distintos códigos de diseño en la respuesta? ¿Qué diferencia hay entre el uso de diagonales equivalentes y elementos placa para modelar los muros? ¿Qué respuesta tienen los edificios ante los registros sísmicos y los espectros de diseño? ¿El sistema de rehabilitación fue eficiente?, estos cuestionamientos y otros son el tema de discusión de este último capítulo.

Dada la extensión del trabajo se dividirá en orden de lo particular a lo general, empezando por las diferencias de inercia agrietada de los elementos.

### I. INERCIA:

- a) El uso de diferentes códigos, dan diferentes factores de agrietamiento y tienen diferentes consideraciones; de los cuales el código del ACI319 generó modelos más flexibles que el código ACI318 o las NTC17. El modelo 15 que mostró ser el más flexible ya que utilizaba el código ACI369 y diagonales equivalentes, presentaba deformaciones 158% mayores al modelo 11 B que tiene sección bruta, lo que representa un incremento considerable.
- b) Se trabajaron con factores de inercia desde 1 hasta 0.55 en las columnas, y de 1 hasta 0.25 en las losas.



- c) Los cambios produjeron una variación en los periodos fundamentales del edificio desde 0.32s hasta 0.84s que representa una diferencia de 160%.
- d) El incremento en la flexibilidad del edificio generó incrementos del 155% en promedio, en los desplazamiento y distorsiones en ambas direcciones.

## II. MODELOS:

- a) La modelación con el uso de placas como muros, generó modelos más rígidos con periodos, desplazamientos, distorsiones y elementos mecánicos menores a los modelos con diagonales; los modelos con diagonales presentaron un comportamiento más flexible cuando se usaba 1 sola diagonal que con el uso de 3.
- b) Entre cada modelo se iba reduciendo la inercia por factores mayores que iban generando una mayor flexibilidad en los modelos e incrementando las distorsiones, desplazamientos y los periodos llegando incluso a cambiar la dirección del primer periodo con el segundo.

## III. DEMANDA SÍSMICA:

- a) Se utilizaron espectros de las normas de 1966 y 2017 y un registro sísmico del 2017 obtenido de la estación más cercana al edificio; el espectro de las NTC 17 presentó aceleraciones 607 % mayores que el espectro de 1966 en los modelos más rígidos y 727% mayores en los modelos más flexibles; y con respecto al registro de la estación presentó aceleraciones 162% mayores en los modelos más rígido y 195% mayores en los modelos más flexibles.
- b) La diferencia entre el uso de un espectro o de otro fue notable en el incremento de los elementos mecánicos teniendo diferencias de hasta 372% en el cortante transversal, 237% en el cortante longitudinal y 152% en la carga axial entre el espectro de las NTC 17 y NTC1966.



- c) Los desplazamientos transversales son 538% mayores, los longitudinales son 406% mayores y las distorsiones longitudinales son 416% mayores al utilizar el espectro de las NTC 17 en comparación con las NTC1966.

#### IV. REFUERZO:

- a) El refuerzo presentó de manera general una mejora estructural, los modelos presentaron una reducción en la magnitud de los elementos mecánicos, distorsiones y desplazamientos en dirección longitudinal; por otro lado, los mismos elementos en dirección transversal tuvieron un comportamiento diferente presentando incluso algunos incrementos.
- b) La mayor parte del refuerzo como las vigas de acero en las escaleras y los cables fueron colocados en dirección longitudinal, esto generó mejor comportamiento en dirección longitudinal, pero afectó la dirección transversal la cual incluso presentó incrementos dada la redistribución de los esfuerzos.
- c) En dirección longitudinal el uso de cables mostró mayor estabilidad en el cortante ante la diferente demanda sísmica, ya que la diferencia entre los modelos 10 a 15 y 20 a 25 en los modelos sin refuerzo es del 30% y en los modelos rehabilitados la diferencia es del 12%.
- d) La carga axial presentó una reducción del 12% en modelos con placas y un incremento del 18% en modelos con diagonales.
- e) Se observó que la participación de los cables era mayor mientras menor fuera la rigidez del edificio.
- f) Los periodos se vieron reducidos en un 7% en promedio con respecto a los modelos originales.
- g) Las distorsiones en dirección longitudinal disminuyeron 19% en promedio, sin embargo, se presentó un cambio en la forma de la curvatura original que mostraba el nivel 1 como el nivel más débil y que en el modelo rehabilitado pasa a ser el nivel 3, dicho comportamiento se relaciona con la incorporación de vigas de acero en las zonas de escaleras para proporcionar continuidad, este cambio generó que aunque en



promedio hubo una reducción en las distorsiones en todos los niveles, las del nivel 3 incrementaron.

- h) El cortante en dirección longitudinal tuvo una disminución promedio del 52%, y el cortante transversal de los modelos con diagonales tuvo un incremento del 7% promedio.
- i) El momento se incrementa en un 13% en los modelos con diagonales, pero en relación con la combinación carga axial-momento, se ve una disminución. Los modelos con placas tuvieron una reducción del 78%.
- j) Los modelos que usaron placas tuvieron una reducción en ambas direcciones de distorsiones, desplazamientos y elementos mecánicos llegando a verse muy rígidos; los modelos con diagonales presentan comportamientos variables como los mencionado en puntos anteriores.

#### V. CAMBIOS EN LOS CABLES:

- a) El aumento en el diámetro de los cables no generó ninguna variación en los periodos del modelo 10 que representa un modelo con placas; pero en el modelo 15 el uso de diámetros de 3 a 6 pulgadas generó una reducción del 33% y con el uso de diámetros de 8 a 18 pulgadas se tuvo un incremento del 81%.
- b) El uso de diámetros de 3 y 4 pulgadas generó un cambio en el orden los periodos de vibrar pasando a ser el modo 1 el modo 2.
- c) Las distorsiones en dirección longitudinal no presentan ningún cambio, pero en dirección transversal el uso de diámetros de 3 a 6 pulgadas genera una reducción promedio del 41% y el uso de diámetros de 8 a 18 pulgadas genera un incremento promedio del 100%.
- d) El cortante y el momento se reducen 28% y 31% respectivamente en promedio con el uso de diámetros de 3 a 6 pulgadas y un incremento del 110% en promedio con el uso de cables de 8 a 18 pulgadas.



- e) El incremento en el diámetro de los cables genera una reducción en la variación del cortante y el momento en dirección longitudinal de hasta el 25% en promedio, ante el aumento de la demanda sísmica.

#### VI. RECOMENDACIONES A FUTURO:

- a) Como se mencionó en el capítulo 3 existen diferentes técnicas de refuerzo y rehabilitación, en esta tesis se analizó el uso de cables que fue el principal método utilizado, pero se pueden comparar diferentes métodos de refuerzo y ver la respuesta.
- b) Se hizo el análisis con la configuración de cables reales, pero se puede analizar si el cambio en dicha configuración genera un efecto importante en el comportamiento del edificio.
- c) Se hizo hincapié en el hecho de que la dirección transversal se vio afectada al concentrar el refuerzo tanto de cables como de las vigas en dirección longitudinal, por lo que buscar una forma íntegra de rehabilitar ambas direcciones se puede analizar a futuro.
- d) Se puede generar un estudio más detallado realizando interacción entre suelo y estructura, análisis dinámico incremental o pushover.
- e) Estudios de viabilidad económica ante el elevado costo que algunos métodos de refuerzo representan.
- f) Análisis de reglamentos que traten específicamente el refuerzo de edificios dañados.

Se considera que el proyecto arrojó resultados satisfactorios ante las interrogantes iniciales, se generó una visión general sobre el cambio en todas las variables mencionadas y se abarcaron otras de manera más específica. Este proyecto fue parte de un proyecto integral más grande en el que participa la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y que complementa el trabajo realizado por diversos grupos de investigación en el país, marca la continuación de proyectos realizados y sirve como precedente para diferentes líneas de investigación que nacerán ante la incesante necesidad de entender cada vez más el efecto que



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



los fenómenos sísmicos tienen en las estructuras y sus respuestas ante las mismas. Los ingenieros debemos aceptar ciertos riesgos a la hora de plantear diferentes hipótesis sobre el comportamiento de aquello que planteamos entender, con la finalidad de proporcionar experiencia, información y generar resultados que garanticen el mejor desarrollo de la sociedad, y aceptar nuestro compromiso y obligación como pieza clave en el presente y futuro del país y del mundo.

Para terminar el trabajo cito al ingeniero de la UNAM Daniel Reséndiz Núñez en su libro “El Rompecabezas de la Ingeniería”:

“Con todo proyecto se plantea un nuevo problema, cada uno implica el riesgo de incursionar en lo desconocido, ..., Si no fuera porque aceptamos el riesgo de innovar, tendríamos que seguir cruzando los ríos a nado, no sobre puentes y el océano en balsas no en navíos ni aviones.” (Núñez, 2008).





## Bibliografía

(n.d.).

ACI 318-19. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.

ACI369-11. (2011). *Guide for Seismic Rehabilitation of Existing Concrete Frame Buildings and Commentary*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.

Aguilar, J., F. Breña, S., Jara, M., Iglesias, J., & Picado, M. (1996). *Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in Mexico City*. Austin Texas: Ferguson Structural Engineering Laboratory.

Álvarez, C. R. (2018). Efectos de sitio de sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. *Geotecnia*, 18-22.

Asteris, P. G., Sophianopoulos, D., Antoniou, S., & Chrysostomou, C. Z. (2011). Mathematical Macromodeling of Infilled Frames: State of the Art. *Journal of Structural Engineering*.

Barbat, A., Rodellar, J., Ryan, E., & Molinares, N. (1993). *Comportamiento Sísmico de Edificios Con Un Sistema No Lineal de Control Híbrido*. Claverton Down.

Bazán, E., & Meli, R. (1999). *Diseño Sísmico de Edificios*. México: Limusa.

Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. México, D.F: Comisión Federal de Electricidad.

Departamento del Distrito Federal. (1966). *Nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. México, D.F.

Freyssinet. (2013). *Reparación y refuerzo frente a sismo de edificios existentes*. Francia.

Gómez Bernal, A., Juárez, H., & Iglesias, J. (n.d.). Intensidades y demandas de ductilidad de sismos recientes en la ciudad de México.



## USO DE CABLES POSTENSADOS PARA LA REHABILITACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS



- México, I. d. (2019). *Guía Técnica Para La Rehabilitación Sísmica de Edificios Escolares de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Núñez, D. R. (2008). *El rompecabezas de la ingeniería*. México, D.F: Fondo de Cultura Económica.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. (2017). Ciudad de México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- SASID. (2020, Abril 24). *SASID*. Retrieved from <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/>
- Servicio Sismológico Nacional. (2019, diciembre 2). *Servicio Sismológico Nacional*. Retrieved from <http://www.ssn.unam.mx/>
- Sismos México*. (2020). Retrieved from [www.sismosmexico.org](http://www.sismosmexico.org)
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. (2018). Efectos de sitio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México. *geotecnia*, 18-22.
- Tsionis, G., Apostolska, R., & Taucer, F. (2014). *Seismic strenghtening of RC buildings*. Ispra, Italia: European Union.
- Weiser, D., Hunt, J., Jampole, E., & Gobbato, M. (2018). *Puebla, Mexico Earthquake on September 19,2017*.