



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD SÍSMICA DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES CON PARTES POLIMÉRICAS**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Francisco Javier Solís Alvarado

Dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Querétaro, Qro., mayo de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Determinación de capacidad sísmica de elementos estructurales con partes poliméricas

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Francisco Javier Solís Alvarado

Dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Secretario

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Vocal

M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Dr. Enrique Rico García
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Mayo de 2025

México



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD SÍSMICA DE ELEMENTOS
ESTRUCTURALES CON PARTES POLIMÉRICAS

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:
Francisco Javier Solís Alvarado

Dirigido por:
Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Presidente

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Secretario

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Vocal

M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Dr. Enrique Rico García
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo de 2025

RESUMEN

Los marcos de concreto reforzado son deformados en función de las cargas aplicadas. Reforzarlos de forma superficial con polímeros reforzados con fibra de carbono ha tomado relevancia en décadas recientes, aunque existe una falta de estudios relevantes referentes a los marcos dañados y rehabilitados con este mismo material. Actualmente, el análisis de elementos finitos se ha empleado para modelar estructuras en 2D o 3D, siendo esta última opción la empleada en el presente trabajo debido a las características prestadas. El caso de estudio presente fue una universidad diseñada de acuerdo con la normativa del INIFED, donde se definieron vigas y columnas con dimensiones diferentes para cada nivel. Una vez que se determinó el marco crítico o más esforzado, se replicaron las características geométricas y mecánicas en ANSYS para el análisis de elemento finito. Para el marco fracturado y rehabilitado, fueron reforzadas las uniones viga-columna y el sofito de las vigas con laminados de fibra de carbono y laminados de fibra de carbono con barras de acero, respectivamente. Se analizaron cargas gravitacionales y cargas sísmicas, obteniendo como resultado las deformaciones totales y esfuerzos equivalentes en los marcos fracturados y rehabilitados. Gracias a la incorporación de laminados de fibra de carbono, se obtuvo una disminución de las deformaciones mayor al 10% y un incremento en los esfuerzos equivalentes con cargas gravitacionales, mientras que para las cargas sísmicas se tiene un aumento en las deformaciones del 10%, pero una disminución en los esfuerzos equivalentes de casi 30%. Lo anterior indica un comportamiento inverso en cuanto a las deformaciones y los esfuerzos, dado que al disminuir el primero se aumenta el segundo, y al aumentar el primero se disminuye el segundo. Por lo tanto, la incorporación de laminados de fibra de carbono y barras de acero es efectivo en la disminución de deformaciones y el aumento de la carga portante. Es necesario realizar investigaciones que prueben configuraciones regulares e irregulares en marcos y dimensiones de elementos estructurales, con la finalidad de determinar la influencia de cada uno de estos factores.

Palabras clave: ductilidad, marco de concreto, rehabilitación, fibra de carbono

ABSTRACT

Reinforced concrete frames deform according to the applied loads. Surface reinforcement using carbon fiber-reinforced polymers has gained importance in recent decades, although there is a lack of relevant studies regarding damaged frames rehabilitated with this same material. Currently, finite element analysis has been used to model structures in 2D or 3D, with the latter being employed in the present study due to the characteristics involved. The case study involved a university building designed according to INIFED regulations, with beams and columns defined with different dimensions for each level. Once the critical or most stressed frame was identified, its geometric and mechanical characteristics were replicated in ANSYS for finite element analysis. For the fractured and rehabilitated frame, the beam-column joints and the beam soffits were reinforced with carbon fiber laminates and carbon fiber laminates combined with steel bars, respectively. Gravitational and seismic loads were analyzed, resulting in total deformation and equivalent stress in both the fractured and rehabilitated frames. Thanks to the incorporation of carbon fiber laminates, a reduction in deformation of over 10% was achieved, along with an increase in equivalent stresses under gravitational loads. In contrast, seismic loads led to a 10% increase in deformation but a nearly 30% decrease in equivalent stress. This indicates an inverse relationship between deformation and stress, as a decrease in one result in an increase in the other, and vice versa. Therefore, the incorporation of carbon fiber laminates and steel bars is effective in reducing deformation and increasing load-bearing capacity. Further research is needed to evaluate regular and irregular frame configurations and structural element dimensions to determine the influence of each of these factors.

Key words: ductility, concrete frame, rehabilitation, carbon fiber

*A mi madre, por su apoyo incondicional,
valiosos consejos, y ánimo en todo
momento.*

*A mi hermana, a quien le deseo éxito en
su carrera profesional y vida personal.*

*A mi tía, por estar al pendiente de mi
bienestar.*

*A la memoria de mi abuelita, que siempre
me cuidó y me amó muchísimo.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por la oportunidad brindada de cursar un posgrado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo recibido durante mis estudios de posgrado.

A mi director de tesis, Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, por proveerme el tema del cual ha resultado el presente trabajo, aconsejándome a lo largo de la maestría.

Al M. en C. Iván Fermín Arjona Catzim, por sus valiosos consejos y sugerencias, dando un muy importante seguimiento semanal para la realización de esta tesis.

Al coordinador del programa, Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, por las observaciones y atención prestada durante la duración del posgrado.

Al sínodo, conformado por los Dres. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, Jaime Moisés Horta Rangel, y Enrique Rico García, por sus sugerencias y observaciones, las cuales fueron de gran ayuda para mejorar este trabajo.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	3
1.2. Descripción del problema	4
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1. Rehabilitación de estructuras de concreto.....	5
2.2. Análisis de elemento finito	9
2.3. Laminados de fibra de carbono.....	10
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	13
3.1. Hipótesis	13
3.2. Objetivo general	13
3.3. Objetivos específicos	13
4. METODOLOGÍA	14
4.1. Etapa 1: Modelación de la estructura y PRF a emplear	15
4.1.1. Definición de un caso de estudio de un marco de concreto reforzado.....	15
4.1.2. Caracterización de los elementos estructurales.....	17
4.1.3. Representación de las características y propiedades materiales en ANSYS Workbench.....	18
4.1.4. Modelación de los materiales PRF a emplear en la estructura.	20
4.2. Etapa 2: Análisis con elemento finito	22
4.2.1. Determinación de la resistencia de los elementos.....	22
4.2.2. Análisis con elemento finito de los marcos de concreto.....	23

4.2.3.	Graficación de los resultados obtenidos del análisis con elemento finito.	24
4.3.	Etapa 3: Interpretación de resultados obtenidos	25
4.3.1.	Comparación del marco de concreto original respecto al rehabilitado.....	25
4.3.2.	Relación de las deformaciones de los marcos de concreto al rehabilitar los elementos.....	25
4.3.3.	Revisión del comportamiento sísmico del marco de concreto.....	26
4.4.	Etapa 4: Validación del modelo	26
4.4.1.	Comparación de datos obtenidos del análisis con aquellos determinados por investigaciones previas.	26
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1.	Modelación de la estructura y PRF a emplear	30
5.1.1.	Definición de un caso de estudio de un marco de concreto reforzado.....	30
5.1.2.	Caracterización de los elementos estructurales.....	30
5.1.3.	Representación de las características y propiedades materiales en ANSYS Workbench.....	32
5.2.	Análisis con elemento finito	32
5.2.1.	Análisis con elemento finito de los marcos de concreto.....	32
5.2.2.	Revisión del comportamiento sísmico del marco de concreto.....	34
5.3.	Validación del modelo de referencia.....	35
5.3.1.	Comparación de datos obtenidos del análisis con aquellos determinados por investigaciones previas.	35
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
7.	BIBLIOGRAFÍA	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dimensiones en milímetros de la estructura de prueba (Y. Wang et al., 2023).....	8
Figura 2. Geometría de la viga analizada, modificado de Gotame et al. (2022).	10
Figura 3. Proceso de carga en la viga reforzada con fibra de carbono y cables de acero (Zhu et al., 2020).	12
Figura 4. Diagrama de flujo de las actividades propias de la metodología.	14
Figura 5. Estructura escolar de acuerdo con el INIFED (vista en 3D).....	15
Figura 6. Detalle de vigas y columnas del marco de concreto	16
Figura 7. Marco crítico de la estructura de estudio.	18
Figura 8. Marco de concreto en ANSYS	19
Figura 9. Modelo isométrico del refuerzo de acero en el marco de concreto.....	19
Figura 10. Mallado del marco de concreto	20
Figura 11. Modelado del marco fracturado y rehabilitado.	21
Figura 12. Mallado del marco fracturada y rehabilitado.	21
Figura 13. Imagen ampliada de la fractura en la viga	22
Figura 14. Representación gráfica de SOLID185 y SOLID187.....	24
Figura 15. Deformaciones direccionales y totales en los elementos.	25
Figura 16. Aceleraciones sísmicas aplicadas a los Modelos 1 y 2.	26
Figura 17. Marco de referencia sin rehabilitar.....	27
Figura 18. Refuerzo de acero en el marco de referencia.	27
Figura 19. Mallado del marco de referencia.....	28
Figura 20. Rehabilitación del marco con fibra de carbono.....	28
Figura 21. Mallado del marco rehabilitado con fibra de carbono	29
Figura 22. Momentos en la estructura	30
Figura 23. Marco crítico de la estructura.....	31
Figura 24. Estructura deformada en SAP2000	31
Figura 25. Cargas aplicadas en los marcos de concreto en ANSYS Mechanical.....	32
Figura 26. Deformaciones totales de los Modelos 1 y 2	33
Figura 27. Esfuerzos equivalentes en los Modelos 1 y 2	34
Figura 28. Deformaciones totales por sismo en los Modelos 1 y 2.....	34
Figura 29. Esfuerzos equivalentes por sismo en los Modelos 1 y 2.....	35

Figura 30. Deformaciones totales en los Modelos 3 y 4	36
Figura 31. Esfuerzos equivalentes en los Modelos 3 y 4	36
Figura 32. Deformaciones totales por sismo en los Modelos 3 y 4.....	37
Figura 33. Esfuerzos equivalentes por sismo en los Modelos 3 y 4.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de recuperación de la capacidad estructural de un elemento reparado con resina epoxi, mortero epoxi o mortero de cemento (Gobierno de México, 2023).	2
Tabla 2. Refuerzo de acero longitudinal para los elementos estructurales del marco de estudio.	16
Tabla 3. Características mecánicas de los materiales usados.	18
Tabla 4. Límites mínimos de fc' en estructuras de ductilidad baja (Gobierno de México, 2023)....	23
Tabla 5. Refuerzo de acero en el marco de referencia.	27
Tabla 6. Dimensiones de los modelos	29
Tabla 7. Resultados de los modelos analizados	38

1. INTRODUCCIÓN

La ductilidad es la capacidad de deformación presente en los materiales que constituyen los elementos estructurales, permitiendo altas deformaciones permanentes en ellos previo a la falla o ruptura. Este tema es un área de gran interés dentro del campo de los marcos de concreto, los cuales son un tipo de estructura que se conforma por la conexión entre 1 o más vigas y 2 o más columnas, lo cual permite la transmisión de cargas al suelo. Estos están compuestos por diferentes materiales: acero, madera, o concreto. Respecto a los marcos de concreto, en México el concreto puede ser Clase 1 o 2, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto 2023; se utilizan 2 criterios para separarlos en estas dos clases: peso volumétrico en estado fresco, y resistencia a la compresión (Gobierno de México, 2023).

El refuerzo es un elemento secundario que posee mejores características físicas debido a la forma o al material que está conformado. Para marcos de concreto esto incluye al refuerzo longitudinal con acero, revestimiento con laminados, entre otros. La rehabilitación hace referencia al proceso de intervención estructural para restablecer las condiciones originales o para mejorar el comportamiento de elementos y sistemas estructurales para que la edificación cumpla con los requisitos de seguridad contra colapso y de limitación de daños (Gobierno de México, 2023).

Algunas técnicas de rehabilitación incluyen: 1) reparación local de elementos, 2) reparación de grietas mediante fluidos, 3) encamisados de columnas, vigas o uniones con concreto, acero o compuestos con polímeros reforzados con fibras (American Concrete Institute. & ACI Committee 440., 2017). Sin embargo, una vez dañados y rehabilitados los elementos estructurales, tales como vigas y columnas, existen pérdidas en la ductilidad de estos en función del método y materiales de rehabilitación empleado. Por ejemplo, reparar las grietas con resina epoxi, lechada, mortero epoxi o mortero de cemento produce pérdidas de ductilidad de al menos 10% y como máximo de 30% (Tabla 1).

Tabla 1. Niveles de recuperación de la capacidad estructural de un elemento reparado con resina epoxi, mortero epoxi o mortero de cemento (Gobierno de México, 2023).

Material	Ancho de grieta, mm	Nivel de recuperación por ciento			Características
		Resistencia	Rigidez	Ductilidad	
a. Resina epoxi	0.05 – 5.0	70 – 90	30 – 80	75 – 90	Sensibilidad a altas temperaturas. Difícil de utilizar con material poroso
b. Lechada	>5.0	70 – 90	50 – 80	70 – 90	Para grietas limpias, sin impurezas
c. Mortero epoxi	>5.0	70 – 90	30 – 80	75 – 90	Sensible a altas temperaturas
d. Mortero de cemento		80 – 120	50 – 100	80 – 90	Para elementos con pocas grietas grandes

El presente trabajo tuvo como objetivo modelar un marco de concreto reforzado rehabilitado con laminados de fibra de carbono con cables de acero y laminados de fibra de carbono. Una vez modelado, el marco se analizó con elemento finito con la finalidad de obtener la capacidad de carga y su comportamiento a flexión, definiendo la ductilidad propia del marco. Con estos resultados, fue posible comparar las características propias de un marco de concreto que ha sido rehabilitado con aquellas de uno que no fue dañado en lo absoluto encontrando que existe una disminución de las deformaciones mayor al 10%, con un leve incremento del 1% en los esfuerzos máximos principales, tomando las cargas gravitacionales, mientras las deformaciones aumentan en un 10% con análisis sísmico, con un 30% de incremento en los esfuerzos máximos principales.

A continuación, se describe la justificación de la presente investigación respecto a los marcos de concreto dañados y las alternativas para su rehabilitación, y posteriormente se presenta la descripción del problema abordado, del cual se deriva la hipótesis y los objetivos acordes a solucionarlo. En el capítulo 2 se discuten trabajos previos relacionados con el tema, además de proveer los fundamentos teóricos sobre los cuales se basó el presente trabajo. Dentro del capítulo 3 se define la hipótesis formulada con base en los fundamentos teóricos previamente presentados, además del objetivo general y los objetivos específicos. Después, en el capítulo 4 se establece la metodología desarrollada por etapas que están directamente

relacionadas con los objetivos específicos previamente presentados en el capítulo 3. En el capítulo 5 se presentan los resultados y la discusión relacionada con estos objetivos. Finalmente, en el capítulo 6 se describen las conclusiones y se hacen ciertas recomendaciones para las investigaciones futuras relacionadas.

1.1. Justificación

Los marcos construidos con concreto reforzado que han sido dañados parcialmente, para evitar demolerse, se reparan empleando diversas técnicas de rehabilitación en función del daño presente en los elementos locales que lo conforman. Los materiales empleados deben ser compatibles con los materiales existentes de los elementos, con la finalidad de no perder resistencia o rigidez en ellos de forma significativa, sino que es necesario restaurar lo más cercano a la resistencia, rigidez y ductilidad originales.

Es importante notar que para lograr el objetivo anterior se requiere realizar un diseño y ejecución de la rehabilitación de los elementos, tomando en cuenta el impacto o la gravedad del daño presente y el tipo de los materiales empleados. En algunos casos solo se requiere el relleno de grietas mediante resinas, lechadas o morteros, ya que en otros es necesario reemplazar todo el elemento en su totalidad, asegurando la integridad estructural antes de su remoción y reconstrucción. Otros más pueden repararse mediante la implementación de revestimientos de concreto, acero o polímeros reforzados con fibras (PRF).

La lámina de PRF se adhiere a la estructura a reparar con una resina. Esta técnica mejora la capacidad de corte y flexión de vigas y losas, y también mejora la confinación en columnas y requiere un peso adicional mínimo. Los materiales poliméricos pueden ofrecer ventajas en términos de sostenibilidad y durabilidad, ya que son resistentes a la corrosión y a la degradación a largo plazo. Es preferible utilizar este tipo de rehabilitación con PRF en lugar de llenar las grietas, puesto que la segunda no recupera al completo la resistencia, rigidez, y ductilidad del elemento; por otro lado, emplear técnicas de laminados de fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de aramida, u otros materiales permite una completa recuperación de la resistencia y ductilidad (Y. Wang et al., 2023).

Por lo tanto, aunque se han realizado investigaciones respecto al tema, estas se han enfocado al reforzamiento previo al evento sísmico, por lo que se debe investigar el efecto de los laminados de fibra de carbono después del daño por sismo. La presente investigación tiene como finalidad analizar la reducción de las pérdidas de ductilidad al rehabilitar los elementos de un marco de concreto reforzado que fueron dañados por eventos sísmicos. Esto con el fin de ofrecer sugerencias efectivas para la rehabilitación con laminados de fibra de carbono para marcos de concreto dañados por eventos sísmicos que permitan mayores deflexiones o desplazamientos, contribuyendo a la literatura existente del tema.

1.2. Descripción del problema

Los estudios de rehabilitación se han centrado principalmente en las vigas y columnas reforzadas con encamisados y laminados de fibra de vidrio y fibra de carbono previo al daño sostenido por sismos. Sin embargo, en comparación con lo anterior existe poca información respecto al desempeño dúctil de marcos de concreto rehabilitados de igual manera posterior al daño sísmico en los elementos que lo conforman, tomándolos en cuenta y además a las uniones de estos.

Varios estudios se centran en la influencia de la unión generada por el epoxi entre el elemento de concreto y el encamisado o laminado de polímero reforzado con fibra. Otros más hacen énfasis a la combinación de laminados y encamisados para la recuperación de las características portantes de los elementos estructurales, es decir la capacidad axial, resistencia a cortante y momento. También existen estudios enfocados en los requerimientos de las conexiones entre elementos de concreto con la finalidad de que sea una estructura dúctil. Finalmente, existen experimentos de las distintas combinaciones de materiales para la rehabilitación de elementos y su impacto.

No obstante, se requiere un estudio de elemento finito que modele y/o realice experimentos en marcos de concreto reforzado rehabilitados con laminados de fibra de carbono con cables de acero en el sofito de la viga, y laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna; cabe resaltar que la implementación de fibra de carbono se realiza una vez que existe daño en el marco ocasionado por un evento sísmico, en lugar de previo a que se presente el sismo.

2. ANTECEDENTES

Los temas abordados en esta investigación se dividen en tres partes: 1) rehabilitación de estructuras de concreto, 2) análisis de elemento finito, y 3) laminados de fibra de carbono.

El primer subcapítulo aborda los avances realizados en los últimos años respecto a estructuras rehabilitadas, principalmente con fibra de carbono; no obstante, si bien hay ventajas notorias en la capacidad de carga y deformación, las investigaciones se han centrado principalmente en reforzar previo a que exista un daño debido a eventos sísmicos. Posteriormente, el segundo resalta los métodos existentes para la incorporación de grietas con la finalidad de asemejar los resultados obtenidos en modelos respecto a aquellos propios de la experimentación, además de las diferencias entre los modelos bidimensionales y tridimensionales para el análisis con elemento finito. Finalmente, el tercero presenta los desafíos que implica emplear un laminado de fibra de carbono para su uso en estructuras de concreto, aunque la incorporación de barras o cables de acero en este proporciona un aumento en las capacidades de carga y la ductilidad respecto a aquellas propias de un simple laminado de fibra de carbono.

2.1. Rehabilitación de estructuras de concreto

En los últimos años, el polímero reforzado con fibra (PRF) se ha aplicado ampliamente para el refuerzo sísmico de estructuras de concreto reforzado, gracias a ventajas como la ligereza, la resistencia, la durabilidad frente a la corrosión y la facilidad de construcción (Liu et al., 2023; L. Wang et al., 2023). El método de refuerzo con PRF facilita la construcción eficiente y la renovación económica sin un aumento significativo del espacio ocupado. Lee et al. (2022) estudió la implementación de fibras en el concreto permeable y su efecto en la resistencia a compresión, porosidad, coeficiente de permeabilidad, módulo de elasticidad, entre otros.

Muchos países han implementado regulaciones técnicas relacionadas con el refuerzo con PRF, principalmente para elementos de concreto reforzado. El informe FEMA-P-695 (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997) recopiló los últimos

avances en el campo de la ingeniería sísmica en Estados Unidos, incluyendo una base de datos de registros de movimientos sísmicos, relaciones de atenuación y resultados de análisis probabilísticos del riesgo sísmico de nueva generación, así como métodos de modelado y análisis estructural no lineal, métodos numéricos de simulación de colapsos estructurales y modelado y análisis de incertidumbres.

En Grecia, Rousakis et al., (2021) investigaron casos críticos de marcos de concreto reforzado con traslapos inadecuados de barra por empalme o refuerzos de acero corroídos y los efectos favorables del revestimiento externo con PRF para evitar el fallo prematuro y el colapso estructural. Los resultados arrojan que para diferentes arreglos de refuerzo para columnas de concreto reforzado los efectos de traslapos inadecuados de barras por empalme son más perjudiciales en las columnas aisladas que en los marcos, dado que en estos últimos se genera una redistribución del daño en zonas críticas que no tienen traslapos por empalme que se atribuye a una reducción del cortante último del 11.4% contra un 34.8% en las columnas aisladas. En el caso de barras de acero corroído, al considerar todo el refuerzo como corroído se tiene un efecto más perjudicial en los marcos de concreto reforzado que en las columnas aisladas de este mismo material, también debido a una reducción del cortante último en un 15.6% en comparación con un 20% en marcos de concreto reforzado.

En las décadas recientes, se ha demostrado la efectividad del refuerzo de marcos de concreto reforzado utilizando polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en el refuerzo de marcos de concreto reforzado que no han sido dañados, en lugar de abordar los problemas específicos relacionados con los marcos de concreto reforzado ya dañados. De hecho, es necesario reforzar los marcos de concreto reforzado gravemente dañados después de catástrofes sísmicas (Attari et al., 2019; Garcia et al., 2010; Imjai et al., 2009, 2020; Wattanapanich et al., 2023; Yang, Liang, et al., 2021), para analizar el desempeño sísmico de los elementos y uniones, degradación del refuerzo, y desempeño mecánico. No obstante, hay pocas investigaciones relevantes sobre la eficacia sísmica de los marcos de concreto reforzado dañados utilizando PRFC, y los resultados son débiles, sin ofrecer recomendaciones valiosas para la reconstrucción y rehabilitación posteriores a un terremoto (Y. Wang et al., 2023).

De acuerdo con Wang *et al.* (2023), la ductilidad refleja la capacidad de deformación de los marcos y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

donde μ es el coeficiente de ductilidad, Δ_u es el desplazamiento último dada una carga máxima al 85%, y Δ_y es el desplazamiento por fluencia. Sin embargo, para el marco no reforzado la ductilidad es muy limitada, por lo que la fórmula empleada se modifica como sigue:

$$\mu = \frac{1.97(\beta_v + 0.75)(\sqrt{\lambda + 0.75}) \left(1 - \frac{1}{11.5\eta_c}\right)}{n + 0.54} \quad (2)$$

donde β_v es el valor característico del estribo, λ es la proporción a cortante del claro, η_c es la relación de la resistencia a la flexión de columna-a-viga, y n es la relación de la compresión axial. Estos parámetros se definen debajo.

El valor característico del estribo se define como:

$$\beta_v = \frac{(n_1 A_{s1} l_1 + n_2 A_{s2} l_2) f_{yv}}{f_c A_{cor} s} \quad (3)$$

definiendo n_1 y n_2 como los números de secciones de columnas en dos direcciones, A_{s1} y A_{s2} las áreas de los estribos, l_1 y l_2 las longitudes de las secciones de columnas, f_{yv} es la fuerza a fluencia de los estribos, f_c es el esfuerzo a compresión del concreto, A_{cor} es el área del núcleo de concreto, y s es la distancia entre dos estribos.

La proporción a cortante del claro está dada como sigue:

$$\lambda = \frac{H_n}{2h_0} \quad (4)$$

tomando H_n como la altura de la columna, y h_0 como la altura efectiva de la sección de la columna.

La relación de la resistencia a la flexión columna-a-viga se define debajo:

$$\eta_c = \frac{\sum M_{uc}}{\sum M_{ub}} \quad (5)$$

donde $\sum M_{uc}$ es la suma de los momentos últimos en los extremos de la columna en las regiones del nodo, y $\sum M_{ub}$ es la suma de los momentos últimos en los extremos de la viga en las regiones del nodo.

Finalmente, la relación de la compresión axial es:

$$n = \frac{N}{f_{ck}A} \quad (6)$$

usando N como la fuerza axial, f_{ck} es la fuerza a compresión axial del concreto, y A es el área total del concreto.

En la Universidad de Fuzhou, China, se aplicó una carga horizontal cíclica baja en marcos de concreto de 2 crujías y 2 niveles (Figura 1), la cual simuló los daños iniciales en marcos debido a un evento sísmico, después utilizó laminados de fibra de carbono que reforzaron las uniones de estos. Se analizó el desempeño sísmico, rigidez del marco, capacidad de carga, ductilidad, y dissipación de energía. Lo anterior arrojó una excelente ductilidad en el modo de falla de los marcos de concreto reforzados, dado que aumentó la capacidad de carga horizontal máxima (Y. Wang et al., 2023).

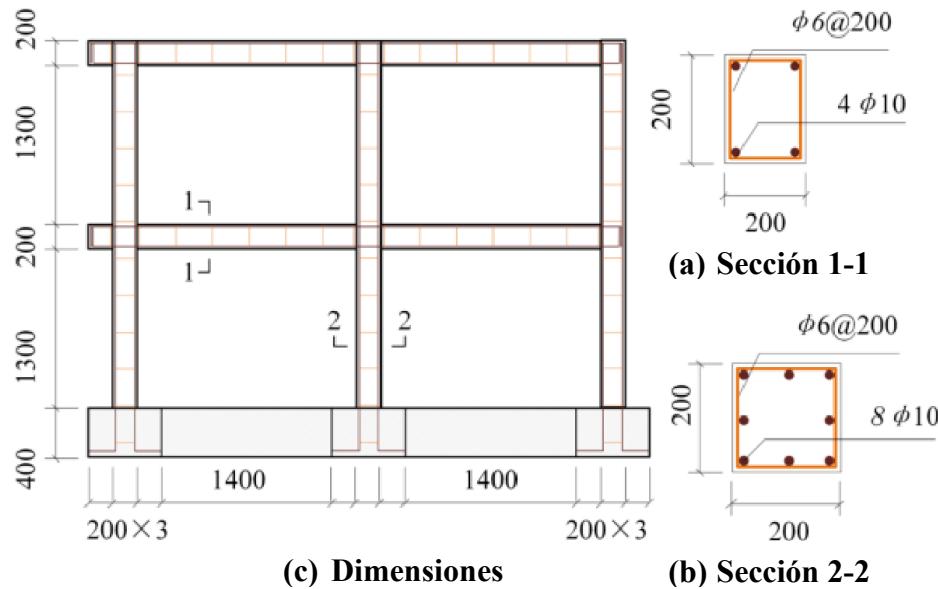


Figura 1. Dimensiones en milímetros de la estructura de prueba (Y. Wang et al., 2023).

2.2. Análisis de elemento finito

El método de elementos finitos (MEF) se utiliza ampliamente en el análisis estructural de construcciones de concreto reforzado. Para modelar vigas de concreto dañadas por corrosión, es necesario considerar los daños, como las grietas causadas por la corrosión y la reducción en el área de refuerzo. Según Blomfors et al. (2020, 2021), el debilitamiento de los elementos de concreto en las zonas de las grietas en un modelo de análisis de elementos finitos (AEF) proporciona resultados razonables en comparación con los resultados de las pruebas, en términos de carga y deflexión, así como la resistencia última. Dado que la corrosión localizada afecta significativamente la resistencia última y la capacidad de deformación de una viga (Yang et al., 2021), la modelación de la corrosión es crucial para prever la capacidad de las estructuras de concreto reforzado dañadas por corrosión.

Anteriormente, se han utilizado modelos de elementos finitos (EF) bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) para analizar vigas de concreto en buen estado, corroídas y reforzadas. Mathern y Yang (2021) utilizan modelos 2D para discretizar la viga, la placa de acero bajo el punto de carga, y el soporte móvil de acero, definiendo sus propiedades materiales y mallando estos elementos en el software ABAQUS. Hawileh et al. (2012) desarrolla modelos en 3D con la finalidad de usarlos como plataforma numérica para la predicción del desempeño de vigas de concreto reforzado con aperturas reforzadas al cortante con compuestos de fibra de carbono.

Aunque el modelo de elemento finito simétrico en 2D puede ofrecer buenos resultados, el modelo EF 3D puede ser necesario por las siguientes razones: 1) los efectos de la corrosión suelen ser tridimensionales, 2) para un tamaño específico de la viga, la suposición de tensión o deformación plana puede no ser completamente precisa, y 3) el refuerzo con PRF puede no aplicarse a toda la anchura de la viga. El análisis mediante el método de elementos finitos (EF) para vigas reforzadas con PRF y con corrosión en la armadura incluye varias tareas importantes. Además de modelar las grietas en el concreto reforzado, se debe prestar especial atención a cómo incorporar los daños por corrosión y cómo modelar la interacción entre el concreto y el refuerzo con PRF. Por lo tanto, es necesario

desarrollar y verificar los métodos de modelado utilizando datos experimentales (Gotame et al., 2022).

En Suecia, se realizó un análisis no lineal de elemento finito en vigas reforzadas con fibra de carbono y fibra de vidrio con la finalidad de determinar el comportamiento a flexión de vigas de concreto dañadas por la corrosión. Estas vigas se modelaron y se compararon sus resultados con aquellos propios de la experimentación (Gotame et al., 2022). La experimentación dio como resultado el cumplimiento del refuerzo a flexión gracias a la combinación de laminado de fibra de carbono en el sofito de la viga y revestimientos en forma de U en los extremos de esta (Figura 2).

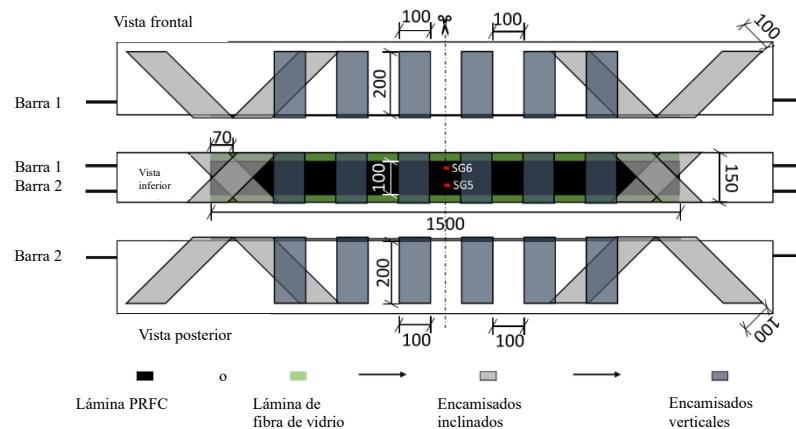


Figura 2. Geometría de la viga analizada, modificado de Gotame et al. (2022).

2.3. Laminados de fibra de carbono

El uso de laminados de fibra de carbono (LFC) es una tecnología de refuerzo para estructuras de concreto que se ha adoptado en proyectos de rehabilitación durante los últimos 25 años (Barnes & Mays, 1999; Chen & Teng, 2001). Los LFC ofrecen numerosas ventajas, como alta capacidad de carga, excelente resistencia a la corrosión, peso reducido y rápida instalación. Por lo tanto, se ha convertido en un tema importante de investigación; algunos estudios experimentales de investigación de vigas reforzadas con LFC fueron llevados a cabo por Sharif et al. (1994), Garden y Hollaway (1998), y Peng et al. (2016). En cada estudio, se descubrió que presforzar el LFC resulta en un incremento de la carga de fluencia y agrietamiento del material.

El refuerzo con LFC ahora está incluido en las normas modificadas de diseño de refuerzo (ACI Committee 440, 2012), y los estándares de producto ahora incluyen requisitos de rendimiento para anclajes de fibra de carbono. Como resultado, el uso de LFC en proyectos de ingeniería de carreteras y ferrocarriles para el refuerzo de vigas de concreto ha aumentado significativamente. Sin embargo, esto también ha revelado una serie de problemas. En primer lugar, el LFC es un material frágil (Soutis & Curtis, 2000). Si hay un defecto en el sistema de pretensado, el laminado puede romperse repentinamente durante la construcción. En segundo lugar, la capacidad del LFC para resistir daños transversales es deficiente, y un proceso de anclaje confiable es difícil de conseguir (Khalifa, 2016; Tanarslan, 2011). Los casos de fallo en el refuerzo están aumentando gradualmente, y los riesgos de seguridad son significativos. En tercer lugar, cuando una viga de concreto reforzado se refuerza con un LFC, su ductilidad se reduce significativamente. Finalmente, durante el transporte y la construcción, el laminado de fibra de carbono es fácilmente dañado. Aunque el LFC dañado no falla durante la tensión, puede romperse repentinamente debido a la acumulación de daños durante el período de servicio, y las consecuencias pueden ser impredecibles (Colombi et al., 2015; Ghafoori et al., 2015).

Recientemente, los materiales compuestos, como los LFC con cable de acero incrustado, han atraído una notable atención investigativa (Hollaway, 2010; Tan et al., 2000). You et al. (2007) estudiaron las propiedades de tracción uniaxial de los materiales compuestos híbridos de fibra, así como el impacto de diversos parámetros, tal como el tipo de fibra, la cantidad de fibra de carbono y el método de aplicación sobre el rendimiento del material. Los resultados de este trabajo permitieron determinar el módulo de elasticidad uniaxial de los materiales compuestos híbridos.

De acuerdo con Zhu et al. (2020), el momento máximo a flexión de una viga reforzada con LFC y cables de acero puede calcularse con las siguientes ecuaciones:

$$M = \alpha_1 f_{c0} b x (h_0 - x/2) \quad (7)$$

$$\alpha_1 f_{c0} b x = f_f A_f + f_{y0} A_{s0} \quad (8)$$

donde M es la capacidad portante última a flexión, α_1 es el coeficiente de cálculo, f_{c0} es el valor de diseño de fuerza a compresión del concreto, b es la base de la viga, x es la altura de

la zona a compresión del concreto, h_0 es la altura efectiva de la sección antes del refuerzo, f_f es el valor de diseño de fuerza a tensión del laminado de fibra de carbono, A_f es el área de la sección transversal de ese laminado, f_{y0} es el valor de diseño de la fuerza a tensión de la barra de acero, y A_{s0} es el área transversal de esa barra.

Una vez que la viga ha sido reforzada con el LFC con cables de acero, debido a la alta deformación por tensión de los laminados, la ecuación queda modificada de la siguiente manera:

$$M = f_{y0}A_{s0}(h_0 - x/2) + \sigma_f A_f(h - x/2) \quad (9)$$

$$\alpha_1 f_{c0} b x = f_{y0} A_{s0} + \sigma_f A_f \quad (10)$$

donde σ_f es el esfuerzo a tensión del laminado de fibra de carbono, y h es la distancia entre el centro del laminado y el borde la zona a compresión del concreto. Los otros términos son análogos a los anteriormente descritos.

En la Universidad de Tecnología de Guilin, China, se emplearon laminados de fibra de carbono con cables de acero (LFCCA) para reforzar vigas de concreto (Figura 3). Se realizaron pruebas de flexión y se compararon sus resultados con laminados de fibra de carbono (LFC). Los experimentos arrojaron que las vigas reforzadas con LFCCA muestran una ductilidad mejorada en comparación con aquellas reforzadas con PFC, y en consecuencia esto mejora la capacidad a flexión de las vigas de concreto (Zhu et al., 2020).



Figura 3. Proceso de carga en la viga reforzada con fibra de carbono y cables de acero (Zhu et al., 2020).

A continuación, el siguiente capítulo presenta la hipótesis y los objetivos de la presente investigación, tanto general como específicos.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis

Aplicar laminados de fibra de carbono para la rehabilitación de elementos dañados en los nodos viga-columna y sofito de la viga en marcos de concreto reforzado dañados por eventos sísmicos disminuye las pérdidas por ductilidad hasta en un 5%, debido al incremento en los desplazamientos de fluencia y último.

3.2. Objetivo general

Determinar la ductilidad de los elementos estructurales de un marco de concreto que ha terminado su vida útil debido al daño ligero a moderado de distintos miembros de concreto que lo componen, gracias a la incorporación de laminados de fibra de carbono para el reforzamiento de la estructura en las uniones viga-columna y el sofito de la viga, con la finalidad de rehabilitar y darle un segundo uso a la estructura de forma segura.

3.3. Objetivos específicos

- Modelar la estructura dañada de concreto reforzado que será reparada o rehabilitada con laminados de fibra de carbono.
- Analizar con el método de elemento finito aplicado a la estructura rehabilitada, evaluando las capacidades portantes y de deformación.
- Comparar la capacidad sísmica de la estructura una vez rehabilitada en relación con su estado previo al fallo, evaluando las deformaciones y ductilidad.
- Definir el grado de acierto de los resultados del modelo con aquellos obtenidos en investigaciones previas de terceros.

4. METODOLOGÍA

La Figura 4 muestra los pasos empleados para el cumplimiento de los objetivos específicos establecidos anteriormente, asignando cada etapa con un objetivo. Tal como se puede apreciar, la metodología se dividió en 4 etapas, esto con la finalidad de delimitar cada actividad como la definición del caso de estudio, el análisis hecho, los resultados obtenidos y su interpretación, y la validación del modelo.

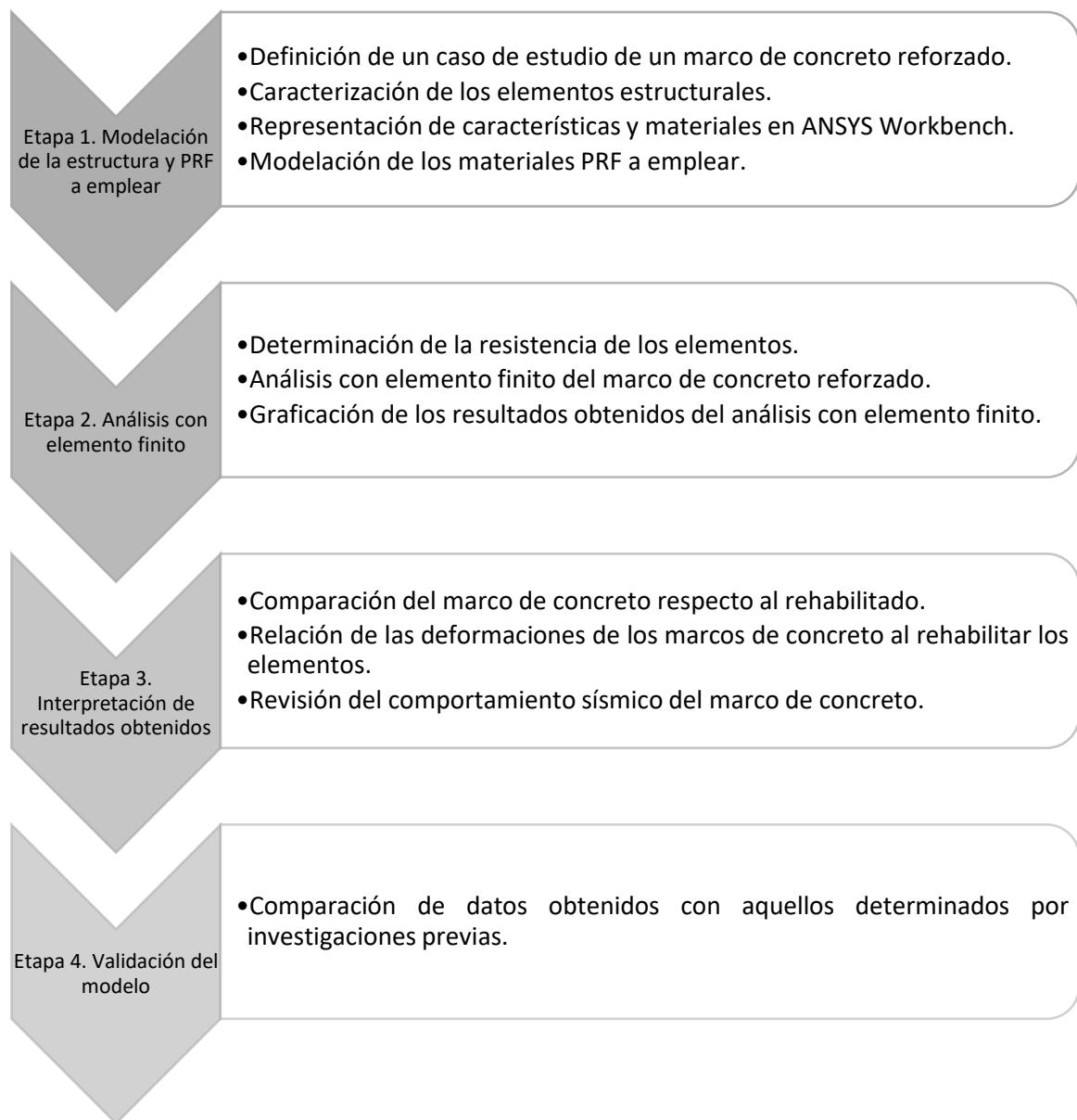


Figura 4. Diagrama de flujo de las actividades propias de la metodología.

4.1. Etapa 1: Modelación de la estructura y PRF a emplear

4.1.1. Definición de un caso de estudio de un marco de concreto reforzado.

La estructura analizada es aquella propia de una universidad diseñada de acuerdo con las normas de la INIFED (Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa), la cual cuenta con 11 crujías o claros a lo largo del eje X, 3 crujías a lo largo del eje Y, y 2 niveles. Las dimensiones de las crujías varían; en el eje X las primeras 4 crujías de izquierda a derecha tienen un dimensionamiento de 3.6 m, para la quinta crujía estas medidas aumentan a un total de 7 m, y las crujías de la sexta a la onceava regresan a las medidas de las primeras cuatro crujías (3.6 m); en el eje Y las crujías de los extremos tienen dimensiones de 6 m, mientras que la crujía central posee una medida de 4 m. Para los niveles, tanto el primer como el segundo nivel tienen dimensiones de 3 m. La Figura 5 proporciona una vista en 3D de la estructura, a la cual se referirá como modelo base.

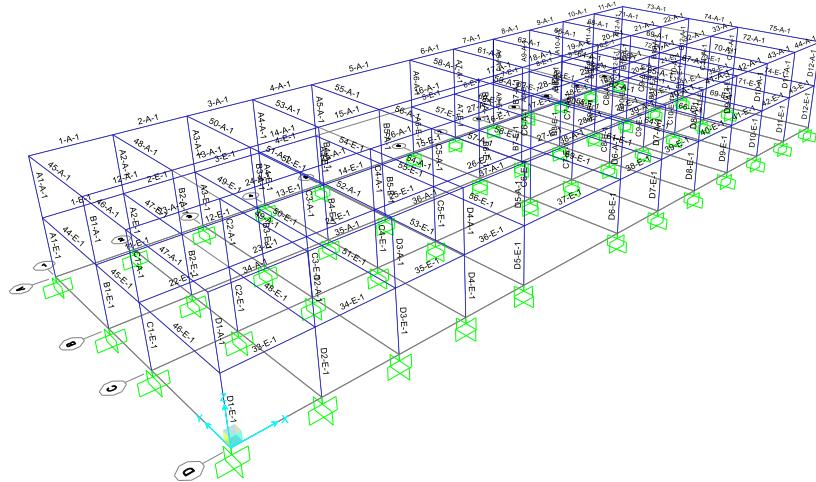


Figura 5. Estructura escolar de acuerdo con el INIFED (vista en 3D)

Las columnas y vigas tienen dimensiones distintas para planta baja y planta alta; las columnas de la planta baja son cuadradas de 45 cm por lado, mientras que las de la planta alta son cuadradas de 40 cm por lado; las vigas de la planta baja son rectangulares de 35 cm de base por 70 cm de altura, mientras que las de la planta alta son de 25 cm de base por 50 cm de altura (Figura 6). Todos los elementos estructurales poseen 5 cm de recubrimiento, por lo que el núcleo confinado por el acero es igual a las dimensiones anteriormente estipuladas para cada elemento con una disminución de 10 cm.

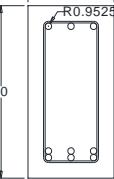
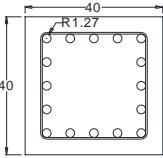
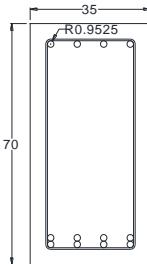
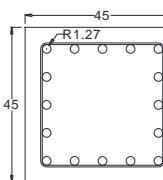
	Vigas	Columnas
Azotea		
Entrepiso		

Figura 6. Detalle de vigas y columnas del marco de concreto

En la Tabla 2 se muestran las características del refuerzo longitudinal empleado en los elementos estructurales, en el caso de las vigas el refuerzo a flexión es 2/3 del total. Además, las varillas para los estribos usados son del #3 o 3/8" de diámetro.

Tabla 2. Refuerzo de acero longitudinal para los elementos estructurales del marco de estudio.

Elemento	Cantidad de varillas	Diámetro de varilla (pulg.)
Viga de azotea	9	3/4
Viga de entrepiso	12	3/4
Columnas	16	1

Además, se presenta un resumen de las características de los modelos 1 a 4, es decir la geometría, las dimensiones de los elementos, y las características mecánicas de los materiales usados en los mismos.

- Modelo 1: Marco de concreto reforzado de 2 niveles y 3 crujías sin fractura ni rehabilitación, cuyos elementos varían sus dimensiones según el piso. Primer piso con columnas cuadradas de 45 cm por lado y vigas rectangulares de 35 cm de base y 70 cm

de altura. Segundo piso con columnas cuadradas de 40 cm por lado y vigas rectangulares de 25 cm de base y 50 cm de altura. Concreto con $f'_c=25$ MPa, acero con $f_y=420$ MPa.

- Modelo 2: Marco de concreto reforzado cuya geometría y dimensiones de vigas y columnas son iguales a las del primer modelo, con fractura en vigas ubicadas en los extremos del primer y segundo piso, rehabilitado usando laminados de fibra de carbono en el sofito de estas vigas y en las uniones viga-columna. Concreto con $f'_c=25$ MPa, acero con $f_y=420$ MPa, fibra de carbono con $f_y=513$ MPa.
- Modelo 3: Marco de concreto reforzado de 2 niveles y 2 crujías sin fractura ni rehabilitación, con elementos cuadrados en columnas y vigas. Ambos elementos poseen dimensiones de 20 cm por lado, cambiando solamente la configuración del acero de refuerzo. Concreto con $f'_c=35.4$ MPa, acero con $f_y=420$ MPa.
- Modelo 4: Marco de concreto reforzado cuya geometría y dimensiones de vigas y columnas son iguales a las del tercer modelo, con fractura en todas sus vigas, rehabilitado usando laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna. Concreto con $f'_c=35.4$ MPa, acero con $f_y=420$ MPa, fibra de carbono con $f_y=513$ MPa.

4.1.2. Caracterización de los elementos estructurales.

Una vez realizado el análisis gravitacional y sísmico en los elementos estructurales, es necesario identificar el marco crítico o más esforzado. En este caso se encuentra a lo largo del eje Y de la estructura universitaria. El marco crítico en cuestión tiene 2 niveles de 3 m cada uno, y 3 crujías con una longitud de 6 m en las orillas y 4 m en la central (Figura 7). En este caso, pocos elementos presentaron daños severos, con deformaciones ligeramente plásticas. De ahora en adelante, “Modelo 1” hará referencia al marco de concreto reforzado sin rehabilitar, y “Modelo 2” al marco de concreto fracturado y rehabilitado con laminados de fibra de carbono en uniones viga-columna y el sofito de la viga.

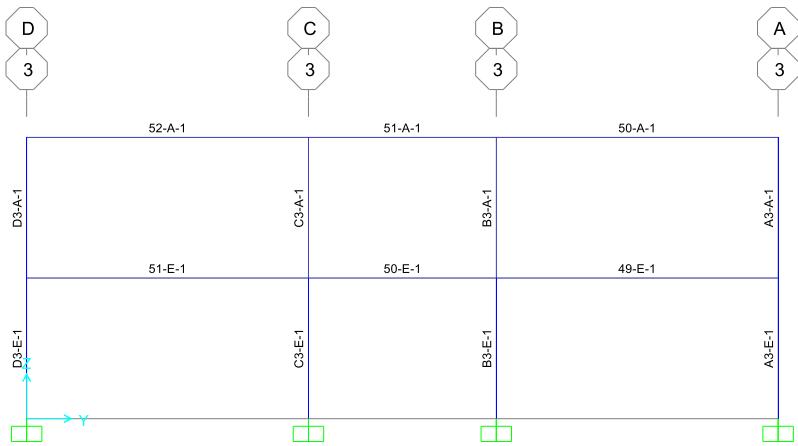


Figura 7. Marco crítico de la estructura de estudio.

4.1.3. Representación de las características y propiedades materiales en ANSYS Workbench.

Se modela el marco crítico previamente identificado, los materiales empleados son concreto y acero. Las características mecánicas que ambos materiales tienen en común se detallan en la Tabla 3, cuyos valores son definidos en el apartado *Engineering Data* del módulo *Static Structural* de ANSYS Workbench. Las dimensiones se dan en MPa en lugar de kg/cm².

Tabla 3. Características mecánicas de los materiales usados.

Material	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de Poisson
Concreto	25	-	22,000	0.2
Acero	-	420	200,000	0.3

Para la representación de los elementos de concreto y el refuerzo de acero, se utilizó el software *SpaceClaim*. En este proceso, el concreto de las vigas y columnas se modeló como sólidos con volumen, mientras que el refuerzo de acero longitudinal y transversal fueron representados mediante líneas con sección sólida. Cada sólido y línea fueron asignados de las propiedades físicas y mecánicas del concreto y acero, respectivamente. La Figura 8 muestra cómo los elementos tienen diferentes colores dado que el marco no fue

modelado como un solo elemento continuo, y la Figura 9 muestra los elementos sólidos transparentes para ver el refuerzo de acero empleado.

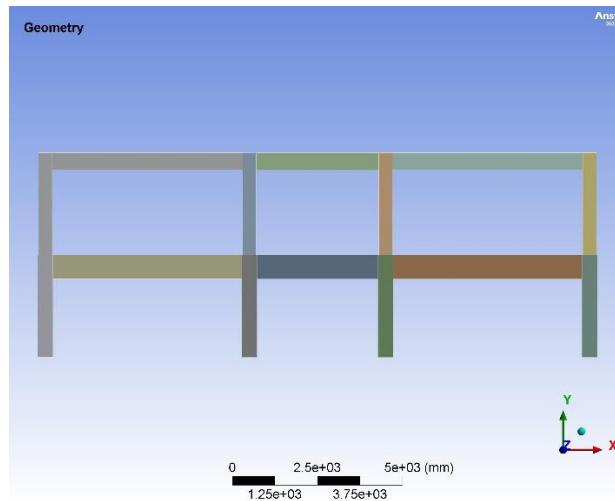


Figura 8. Marco de concreto en ANSYS

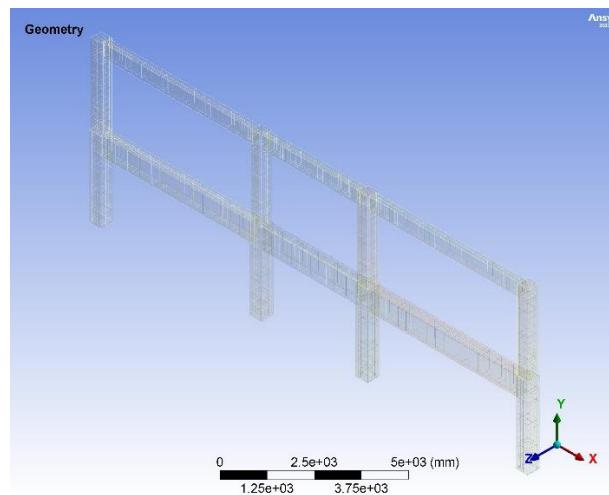


Figura 9. Modelo isométrico del refuerzo de acero en el marco de concreto.

Es importante destacar que el marco de concreto no fue modelado como un único bloque o un solo elemento continuo, sino que en lugar de eso se optó por modelar cada columna y viga por separado, asignando superficies de contacto tipo columna-viga y columna-columna. Este acercamiento facilita la aplicación de cargas en las superficies respectivas de cada elemento estructural, y por consiguiente esta segmentación o separación de los elementos permite la representación realista de una edificación. Además, debido a la

modelación por separado de cada elemento estructural, el tipo de contacto entre los elementos se define como “*bonded*” puesto que esto permite la solución lineal por cargas gravitacionales y un empotramiento de los elementos.

Para el mallado y discretización del marco, existen ciertas guías y recomendaciones respecto al dimensionamiento del mallado que permite un análisis con elemento finito preciso y en el menor tiempo posible. Aunque no existe un tamaño mínimo de las dimensiones de los cubos generados por el mallado, sí existe un tamaño máximo con la finalidad de asegurar la mayor exactitud en el análisis con elemento finito (De Boer et al., 2014).

Este límite está definido por 3 valores: el primero es la longitud, el segundo es la altura, y el tercero es la base. En caso de generar un mallado más fino, el tiempo requerido para el cómputo de la solución es aumentado, mientras que un mallado menos fino implica resultados menos confiables. Por lo anterior, es necesario definir el tamaño ideal para el mallado. El marco fue mallado de elementos lineales con dimensiones uniformes de 50 mm para todos los elementos, tanto vigas como columnas, lo cual está mostrado en la Figura 10.

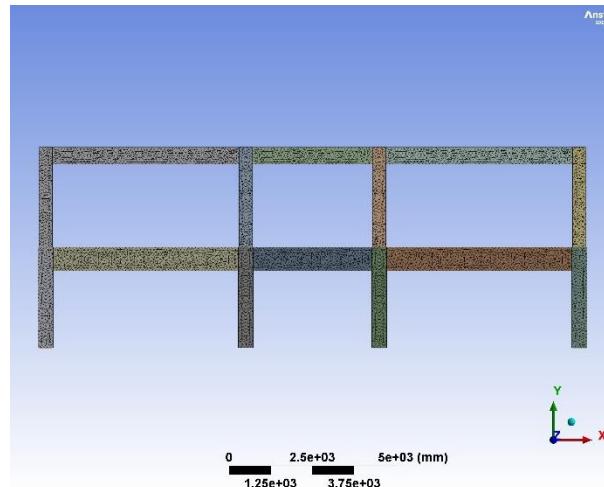


Figura 10. Mallado del marco de concreto

4.1.4. Modelación de los materiales PRF a emplear en la estructura.

Para el refuerzo con laminados de fibra de carbono y barras de acero, se definen las características de los materiales. En el caso de las barras de acero, son de acero con resistencia a la fluencia de 420 MPa y módulo de elasticidad de 200 GPa. Para la fibra de carbono la

resistencia a la fluencia es de 513 MPa y un módulo de elasticidad de 230 GPa. Las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente se definen en el apartado *Engineering Data*, que se encuentra en el módulo *Static Structural* de *ANSYS Workbench*, tal como se realizó en el apartado 4.1.3. Los laminados de fibra de carbono se modelan alrededor de las uniones o viga-columna cerca del extremo de los elementos y en el sofito de la viga, mientras que las barras de acero están solamente en el sofito de la viga (Figura 11).

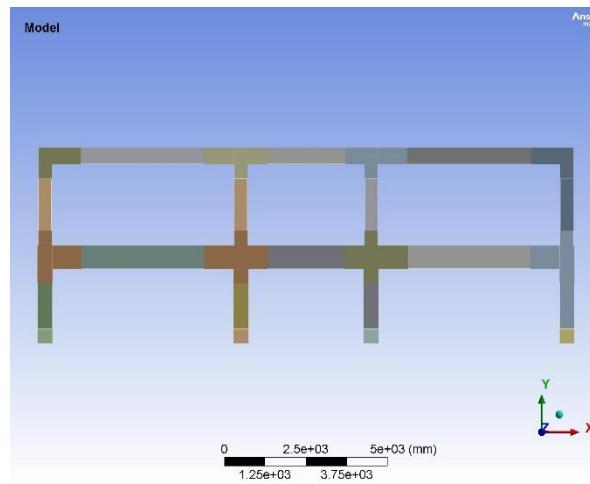


Figura 11. Modelado del marco fracturado y rehabilitado.

Para el mallado de la estructura, se emplearon tetraedros en lugar de cubos lineales, dado que el segundo no permite la inclusión de fracturas en los elementos y su posterior análisis. Lo anterior se ve reflejado en la Figura 12.

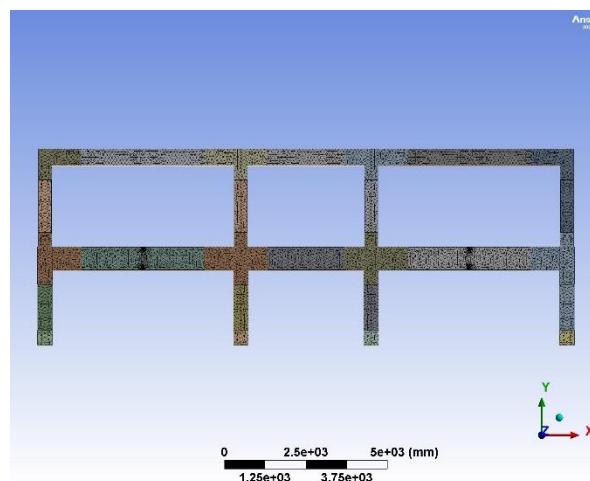


Figura 12. Mallado del marco fracturada y rehabilitado.

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias 2023, una fractura de grado moderado tiene un ancho de entre 0.5 y 1.5 mm, por lo que en el presente trabajo se manejan grietas de 1 mm en las vigas ubicadas en los extremos de ambos pisos debido a una fractura por flexión en la mitad del elemento. Lo anterior se muestra en la Figura 13, la cual es una imagen ampliada de la fractura en la viga izquierda del entrepiso.

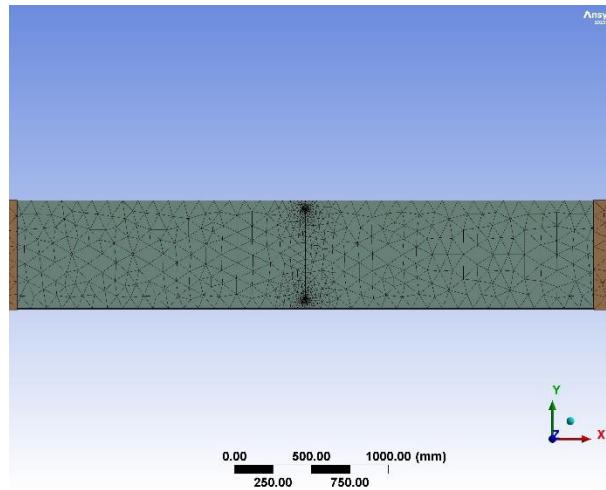


Figura 13. Imagen ampliada de la fractura en la viga

4.2. Etapa 2: Análisis con elemento finito

4.2.1. Determinación de la resistencia de los elementos.

De acuerdo con el diseño estructural realizado con las Normas Técnicas Complementarias, se determinaron los esfuerzos permisibles de los elementos estructurales en el marco de concreto. En general, estos debieron ser evaluados cuidadosamente y ajustados para que sean superiores a las cargas aplicadas y los momentos generados en columnas y vigas, respectivamente.

El marco de concreto se diseñó de acuerdo con el apartado de Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, tomando un enfoque en estructuras de ductilidad baja. Esto se ve reflejado en un aspecto importante como la resistencia del concreto empleado, cuyo límite mínimo es de 25 MPa (Tabla 4). Además, se cumplieron los requisitos de resistencia a flexión, fuerza cortante, desplazamientos, agrietamientos, y carga axial.

Tabla 4. Límites mínimos de f'_c en estructuras de ductilidad baja (Gobierno de México, 2023).

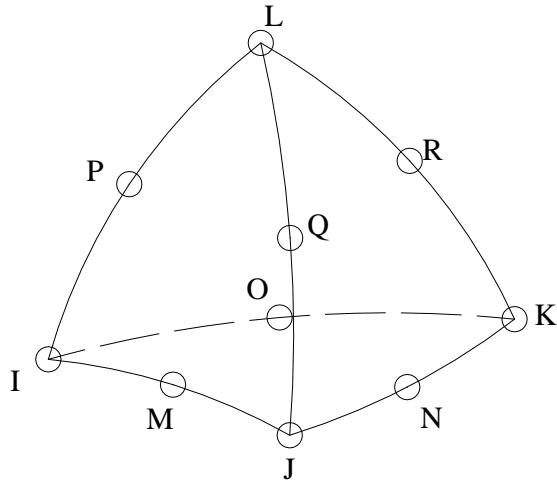
Elementos estructurales	f'_c mínimo, MPa (kg/cm ²)
Cimentaciones	25 (250)
Vigas, columnas, muros, losas, diafragmas	25 (250)
Pilotes prefabricados no presforzados	30 (300)
Pilotes prefabricados presforzados	35 (350)

4.2.2. Análisis con elemento finito de los marcos de concreto.

Para el análisis con elemento finito, AEF, los materiales y elementos se convirtieron a un modelo matemático y finalmente este fue pasado a una discretización o mallado del modelo. Esta discretización se realizó mediante la división del modelo del cuerpo en un sistema equivalente de muchos cuerpos o unidades más pequeños (elementos finitos), los cuales se encuentran interconectados en sus puntos en común entre dos o más de estos elementos y/o líneas fronterizas y/o superficies (University of Victoria, n.d.). Para el refuerzo de acero se empleó el elemento finito REINF264 (Figura 14), dado que este se modela como un cuerpo de línea con capacidades de plasticidad, de rigidez por tensión, y de desplazamiento. Además, cabe destacar que las líneas fueron modeladas de manera discreta, es decir que no se tiene un plano de superficie para la incrustación en los sólidos tal como lo tendría el elemento finito REINF265.

En este caso, se emplearon elementos 3D sólidos para la idealización del marco de concreto en *ANSYS Mechanical*. Para los marcos de concreto se utilizó el elemento finito SOLID187 (Figura 14). Este tipo de elemento tiene la capacidad de plastificarse y deformarse linealmente, 3 grados de libertad con traslación por cada nodo en los ejes X, Y y Z, utilizando 10 nodos en forma de tetraedro. Esto significa que tiene 4 caras con 4 nodos en los vértices y 6 nodos en las aristas. Se emplea este tipo de elemento para los marcos de concreto gracias a la inclusión de fracturas en los elementos y su análisis arroja las deformaciones y esfuerzos en cada eje, además de un total, es decir una deformación y un esfuerzo que engloba todos los ejes, algo que se explica más a detalle en el siguiente apartado.

SOLID187



REINF264 en SOLID187

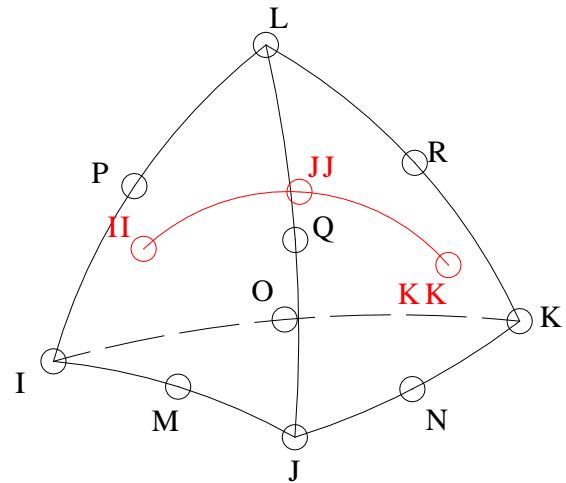


Figura 14. Representación gráfica de SOLID185 y SOLID187.

4.2.3. Graficación de los resultados obtenidos del análisis con elemento finito.

En concordancia con el anterior paso, el software *ANSYS Mechanical* tiene herramientas de graficación de resultados tales como esfuerzos equivalentes, deformaciones direccionales (para cada eje coordenado), deformaciones totales, y reacción en apoyos. Para facilitar la comprensión se usan colores y escalas que permiten ajustarse a los valores máximos y mínimos en función de su ubicación.

Dado que las cargas aplicadas son verticales y horizontales, es preferible utilizar las herramientas de deformación direccional en el eje X y el eje Y, además de la deformación total de la estructura. Esto se debe a que, al delimitar la estructura analizada de la universidad a solamente un marco crítico en 2 direcciones, es posible determinar los ejes coordinados donde se presentan las mayores deformaciones. La Figura 15 muestra cómo se determinan las deformaciones direccionales y totales en los elementos, siendo esta última la empleada para la obtención de los resultados.

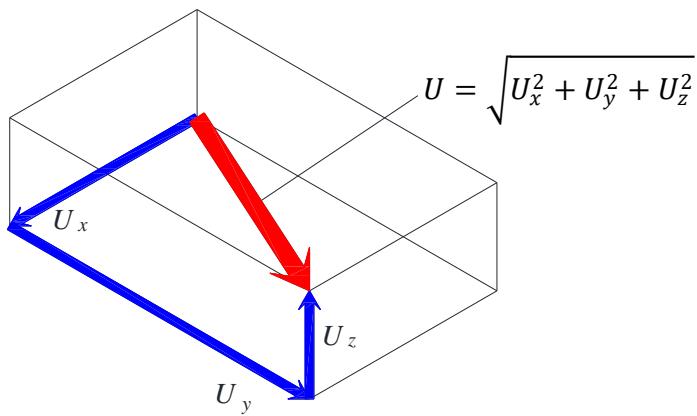


Figura 15. Deformaciones direccionales y totales en los elementos.

4.3. Etapa 3: Interpretación de resultados obtenidos

4.3.1. Comparación del marco de concreto original respecto al rehabilitado.

Se realizó una comparación entre la forma deformada del Modelo 1 y el Modelo 2. Además, los esfuerzos equivalentes arrojados por el análisis se compararon con la finalidad de revisar las diferencias entre la magnitud y localización. Cabe destacar que ambos marcos soportaron las mismas cargas.

Este enfoque permitió la revisión de la incorporación de la rehabilitación con laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna y el sofito de la viga, obteniendo un porcentaje de reducción o aumento de las deformaciones de acuerdo con los resultados obtenidos. En el caso de obtener una reducción en las deformaciones, se buscó la carga portante en la cual las deformaciones del marco de concreto fracturado y rehabilitado se acercan bastante sin sobrepasar aquellas propias del marco de concreto sin rehabilitar.

4.3.2. Relación de las deformaciones de los marcos de concreto al rehabilitar los elementos.

Para comparar las deformaciones de los marcos de concreto se tomaron en cuenta las direccionales en los 3 ejes y las totales. De ambos tipos se hizo una relación de los mínimos y máximos y su ubicación, considerando que las unidades están dadas en milímetros y se usaron 4 cifras significativas después del punto decimal. El resultado se expresa en un

porcentaje respecto al marco de concreto reforzado sin rehabilitar, ya que esto proporciona una visión del cambio debido a la rehabilitación del marco.

4.3.3. Revisión del comportamiento sísmico del marco de concreto.

La obtención de las aceleraciones sísmicas es mediante el Servicio Sismológico Nacional, donde se puede tomar un registro sísmico de cualquier fecha deseada en cualquier lugar de México y tener las aceleraciones en cm/s². El sismo analizado es del 8 de septiembre de 2017, con una magnitud $M_w = 8.2$, tomado de la estación “Salina Cruz” ubicada en. Estos datos se exportaron a Excel, dados en segundos y mm/s², para posteriormente introducirlos en *ANSYS Mechanical* en el módulo de “*Transient Structural*”. Se reduce la cantidad de datos a 5 segundos divididos en 0.01 segundos, mostrado en la Figura 16, dando un total de 501 datos por analizar. Lo anterior se realiza para el análisis sísmico utilizando los datos registrados por el sismómetro al momento de la llegada de las ondas S generadas por el evento sísmico.



Figura 16. Aceleraciones sísmicas aplicadas a los Modelos 1 y 2.

4.4. Etapa 4: Validación del modelo

4.4.1. Comparación de datos obtenidos del análisis con aquellos determinados por investigaciones previas.

Para determinar la precisión del modelo, fue requerido una comprobación con un marco de referencia, al cual se hará referencia como “Modelo 3”. El marco tiene 2 crujías de 2 m y 2 niveles de 1.50 m, lo cual se muestra en la Figura 17.

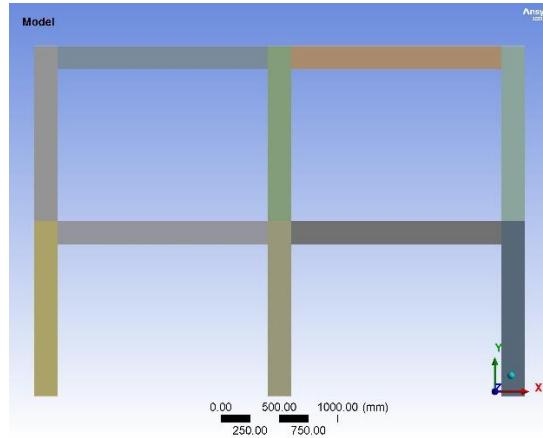


Figura 17. Marco de referencia sin rehabilitar.

Las dimensiones de las vigas y columnas son menores que el Modelo 1, con elementos cuadrados de 20 cm por lado. No obstante, la resistencia a compresión del concreto es mayor en un 40%, con 35.4 MPa. El refuerzo de acero de este marco de referencia está dado en la Tabla 5. La Figura 18 muestra una vista isométrica del refuerzo de acero en el Modelo 3.

Tabla 5. Refuerzo de acero en el marco de referencia.

Elemento	Cantidad de varillas	Diámetro de varilla (mm)
Vigas	4	10
Columnas	8	10
Estríbos	-	6

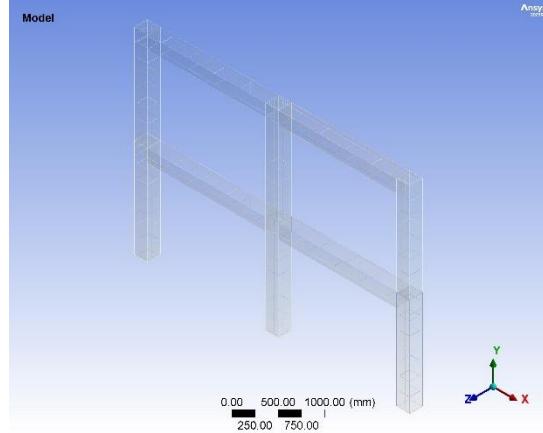


Figura 18. Refuerzo de acero en el marco de referencia.

Al tener dimensiones menores, el tamaño máximo del mallado resulta ser menor, en este caso se mallan elementos de 25 mm con la finalidad de obtener resultados precisos en el menor tiempo de cómputo, tal como en el marco de estudio. La Figura 19 presenta el mallado de este.

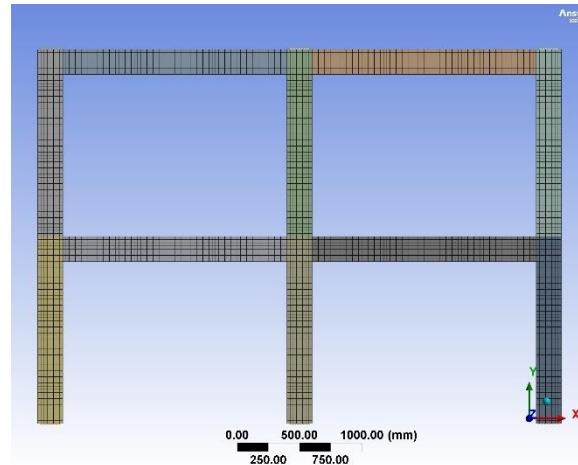


Figura 19. Mallado del marco de referencia.

En el caso del marco de referencia fracturado y rehabilitado con fibra de carbono, al cual se hará referencia como “Modelo 4”, la resistencia y el módulo de elasticidad fue el mismo que aquel propio del Modelo 2. Tal como en el Modelo 2, los laminados de fibra de carbono se modelan alrededor de las uniones o viga-columna cerca del extremo de los elementos, lo cual se muestra en la Figura 20.

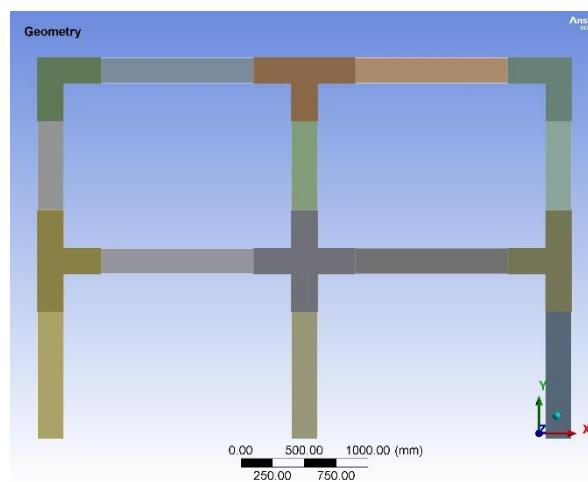


Figura 20. Rehabilitación del marco con fibra de carbono.

Al igual que en el Modelo 4, se emplearon tetraedros en lugar de hexaedros o cubos para el mallado del marco; a diferencia del Modelo 3, se toman dimensiones de 50 mm (Figura 21).

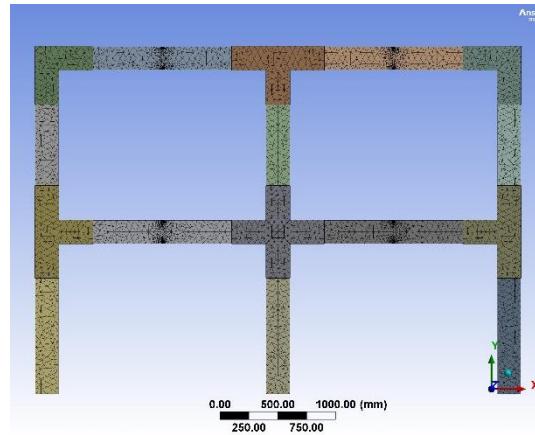


Figura 21. Mallado del marco rehabilitado con fibra de carbono

También se emplean deformaciones, como en el punto 4.2.3., y se comparan estas mismas entre los Modelos 3 y 4. Es importante destacar que se agrega el comportamiento sísmico del marco con el mismo registro usado para los Modelos 1 y 2. Esta configuración del marco se toma de Y. Wang et al. (2023), donde se aplican cargas laterales en un ciclo lento para dañar el marco y rehabilitarlo con laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna con la finalidad de determinar el desempeño y deformaciones. Debajo se resumen las dimensiones de los modelos descritos a lo largo de la metodología (Tabla 6).

Tabla 6. Dimensiones de los modelos

Modelo #	No. de niveles (y altura, m)	No. de crujías (y longitud, m)	Base de viga (cm)	Altura de viga (cm)	Base de columna (cm)	Altura de columna (cm)	¿Fracturado y rehabilitado?
1	2 (3)	3 (6, 4, 6)	35 / 25	70 / 50	45 / 40	45 / 40	No
2	2 (3)	3 (6, 4, 6)	35 / 25	70 / 50	45 / 40	45 / 40	Sí
3	2 (1.5)	2 (2)	20	20	20	20	No
4	2 (1.5)	2 (2)	20	20	20	20	Sí

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Modelación de la estructura y PRF a emplear

5.1.1. Definición de un caso de estudio de un marco de concreto reforzado.

Para determinar el marco crítico en ANSYS, fue necesario calcular las cargas de cada elemento de la estructura en Sap2000 (Figura 22) y ordenar los resultados mostrados en las tablas de resultados del mismo software. Al realizar lo anterior, es posible identificar los elementos estructurales con los mayores momentos.

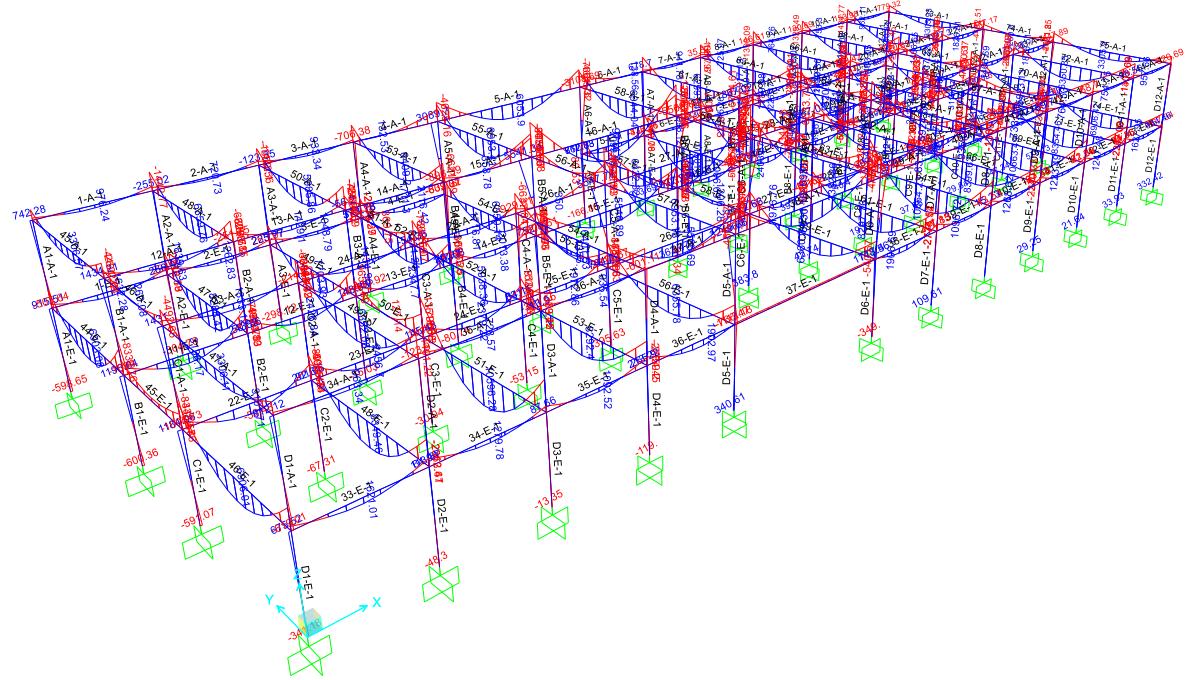


Figura 22. Momentos en la estructura

5.1.2. Caracterización de los elementos estructurales.

Los momentos máximos en el marco crítico previamente definido tienen un valor de -132,572.97 kN-mm en la viga de entepiso 51-E-1, la cual está en el extremo izquierdo del marco, mientras que en la viga de azotea 50-A-1 el valor es de -77,292.07 kN-mm, que se encuentra en el extremo derecho del marco (Figura 23). Estos valores se deben a cargas entre 20% a 40% menores en las vigas de azotea respecto a las vigas de entepiso, generando así menores momentos en los elementos del modelo base. En añadidura a lo anterior, la viga

de entrepiso tiene un momento resistente del doble respecto a la viga de azotea, cuyos valores son de 511,642.35 kN-mm y 256,375.25 kN-mm, respectivamente.

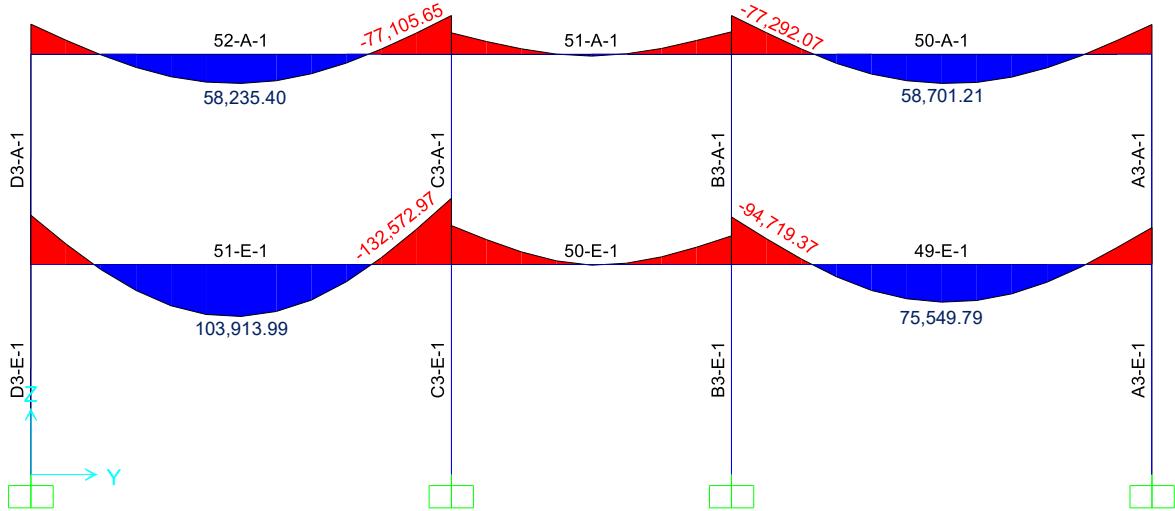


Figura 23. Marco crítico de la estructura

Además, los desplazamientos máximos en las vigas de azotea y entrepiso son de 2.7618 mm en la viga de azotea, mientras que de 1.3161 mm en la viga de entrepiso. Estos resultados llaman la atención, por lo que debe resaltarse una disminución del 49% del área de la sección de las vigas de azotea respecto a las vigas de entrepiso. A su vez, esto se refleja en el momento de inercia empleado para el cálculo de los desplazamientos o deflexiones, el cual disminuye en un 74% para la viga de azotea para el área gruesa. Debajo se muestra el marco deformado, aumentando la escala para una mayor visualización (Figura 24).

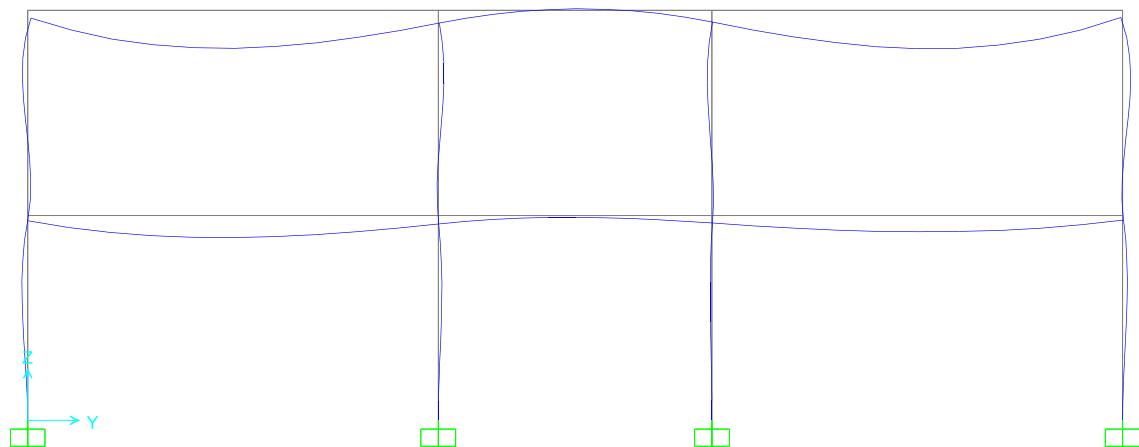


Figura 24. Estructura deformada en SAP2000

5.1.3. Representación de las características y propiedades materiales en ANSYS Workbench.

Para replicar las cargas y deformaciones se usaron presiones lineales sobre las vigas, dadas en N/mm, a lo largo de la cara superior de cada una en el Modelo 1 (Figura 25). Cabe resaltar que las cargas son mayores sobre las vigas de entrepiso, desde un 25% hasta en un 67% al comparar los elementos por su posición vertical; o, como se estableció anteriormente, las vigas de azotea tienen una disminución del 20% hasta 40%. En el Modelo 2 se emplean las mismas presiones en las mismas posiciones.

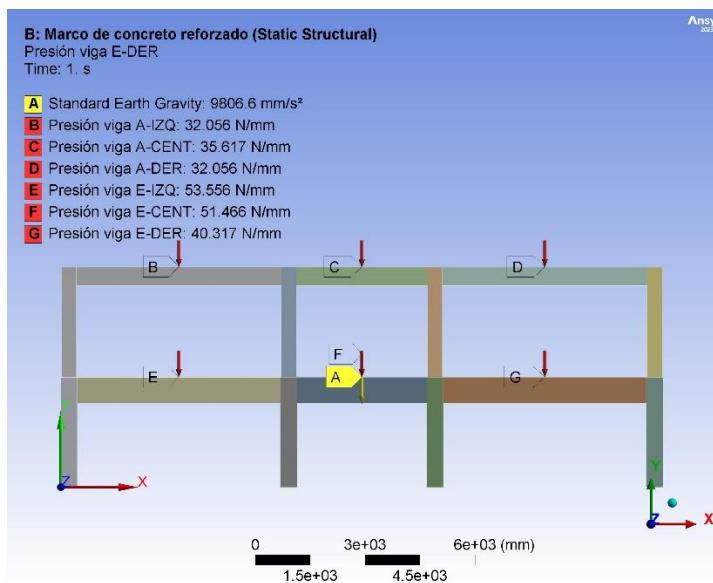


Figura 25. Cargas aplicadas en los marcos de concreto en ANSYS Mechanical

5.2. Análisis con elemento finito

5.2.1. Análisis con elemento finito de los marcos de concreto.

En este caso, en el Modelo 1, la viga de azotea tiene una deformación máxima de 2.7028 mm contra los 2.7618 mm obtenidos previamente en el modelo base, mientras que la viga de entrepiso tiene una deformación máxima de 1.3364 mm contra los 1.3161 mm (Figura 26). Por lo tanto, las deformaciones se aproximan con un 2% de error cuando se replican las cargas, materiales y marco en ANSYS Mechanical comparado a Sap2000, y gracias a la incorporación del marco en 3D con elemento finito se tienen resultados más precisos y confiables. Por otra parte, en el Modelo 2 la viga de azotea tiene una deformación máxima

de 2.3257 mm y la viga de entrepiso tiene una deformación máxima de 1.2154 mm, ambos resultados en las mismas vigas, aunque la posición en la de entrepiso cambia ligeramente debido a laminados de carbono en las uniones viga-columna y sofito de la viga (Figura 26).

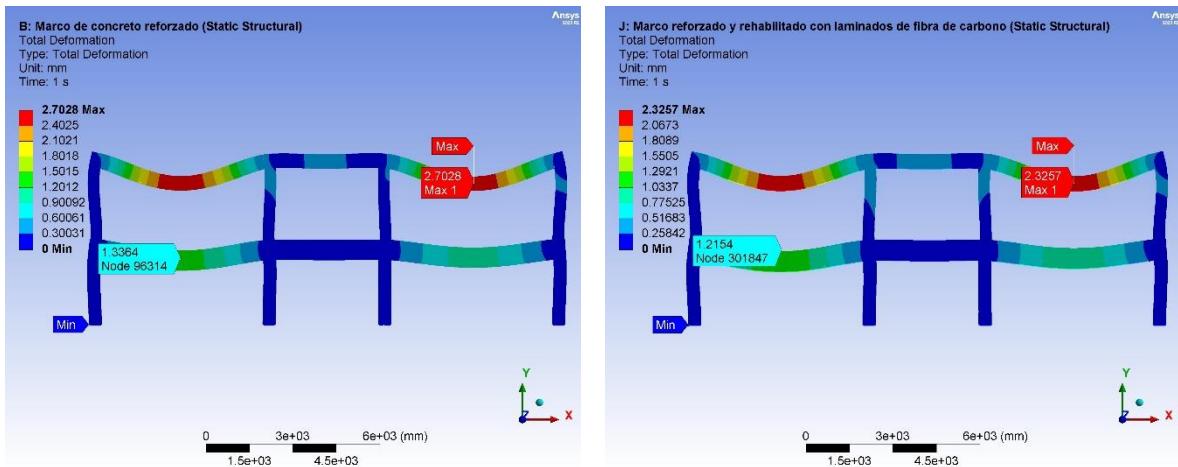


Figura 26. Deformaciones totales de los Modelos 1 y 2

En el Modelo 2 las deformaciones máximas obtenidas son menores a las del Modelo 1 desde un 9.05% hasta en un 13.95% en las vigas que presentaron los momentos máximos. La incorporación de los laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna y el sofito de la viga permitió la disminución de las deformaciones al aplicar las cargas en el marco. Con la finalidad de encontrar deformaciones similares, se aumentaron las cargas aplicadas en el Modelo 2 y se determinó que un aumento del 16% en ellas replica los resultados obtenidos en el Modelo 1.

No obstante, los esfuerzos equivalentes aumentan considerablemente en el Modelo 2 respecto al Modelo 1, aumentando de manera notoria en un poco más de 29 MPa, lo cual es un 44.09%, aunque si se comparan los valores entre los nodos correspondientes a las deformaciones máximas, se tiene hasta un aumento del 115.66% (Figura 27). Este aumento se debe a la rehabilitación realizada con la fibra de carbono y las barras de acero en las uniones viga-columna y el sofito de la viga, permitiendo una redistribución de esfuerzos en la estructura. Por lo tanto, existe una disminución en las deformaciones al mismo tiempo que hay un aumento en los esfuerzos, lo cual se interpreta como un almacenamiento de energía en el marco, la cual no fue liberada en forma de desplazamiento.

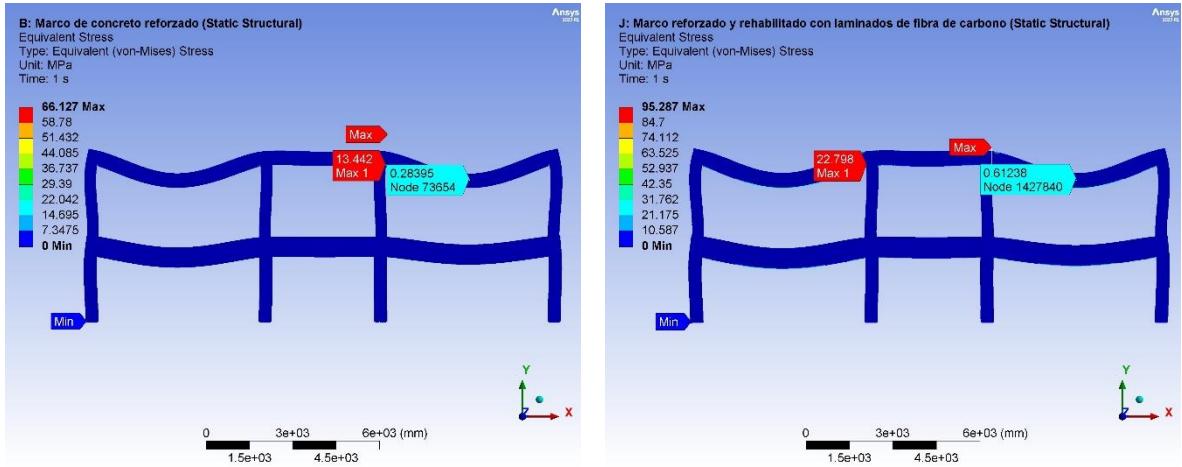


Figura 27. Esfuerzos equivalentes en los Modelos 1 y 2

5.2.2. Revisión del comportamiento sísmico del marco de concreto.

En el análisis de comportamiento sísmico se obtienen menores deformaciones en el Modelo 1, dando un valor máximo de 4.4301 mm, mientras que el Modelo 2 posee una deformación máxima de 4.8122 mm lo cual se puede interpretar como un incremento del 8.62% a pesar de la incorporación de laminados de fibra de carbono. Esto implica que la rehabilitación en las uniones viga-columna y sofito de la viga no son suficientes para contrarrestar las deformaciones generadas por el sismo, y sea necesario revisar los esfuerzos presentes en los modelos con la finalidad de determinar el fenómeno presente por los efectos del sismo. La Figura 28 presenta las deformaciones en los Modelos 1 y 2.

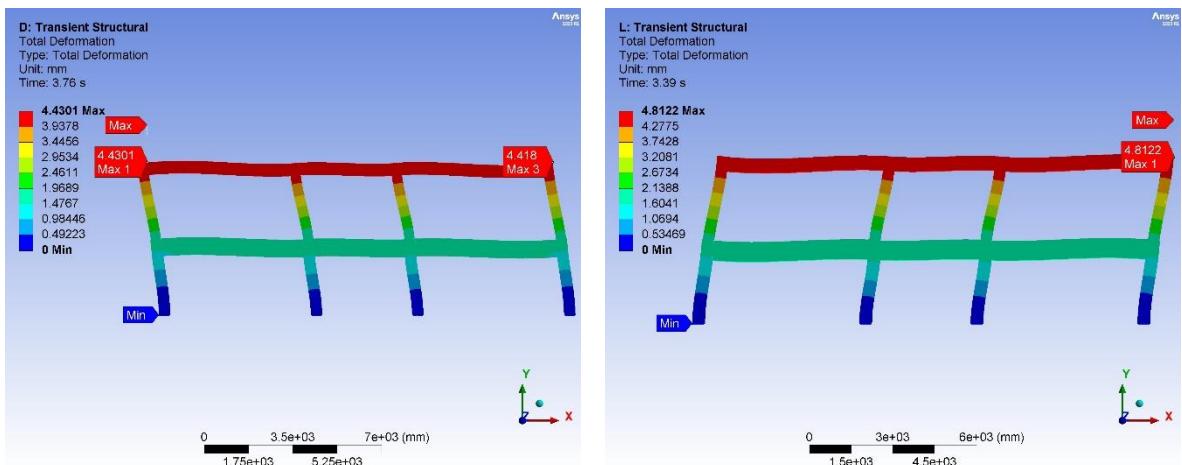


Figura 28. Deformaciones totales por sismo en los Modelos 1 y 2

En concordancia con lo anterior, existe una redistribución de esfuerzos en el marco de concreto debido a la inclusión de laminados de fibra de carbono y barras de acero en las uniones viga-columna y en el sofito de la viga (Figura 29); sin embargo, en este caso los esfuerzos disminuyen en el Modelo 2 respecto al Modelo 1, con valores de 57.148 y 81.142 MPa, en los tiempos y nodos respectivos de los Modelos 3 y 4. Esta disminución del 29.57% en los esfuerzos y el aumento de solo 8.62% en las deformaciones se interpreta como un liberación de los esfuerzos en la estructura. Cabe destacar que el comportamiento de las deformaciones y los esfuerzos equivalentes son completamente opuestos en el análisis sísmico respecto al gravitacional, observando así un comportamiento inverso, dado que cuando las deformaciones aumentan, los esfuerzos disminuyen.



Figura 29. Esfuerzos equivalentes por sismo en los Modelos 1 y 2

5.3. Validación del modelo de referencia

5.3.1. Comparación de datos obtenidos del análisis con aquellos determinados por investigaciones previas.

Las cargas aplicadas son laterales en un solo lado, de 49 kN (5 ton) en la viga de azotea y de 24.5 kN (2.5 ton) en la viga de entrepiso, puesto que se busca replicar los daños generados por un sismo. No obstante, las cargas no pueden replicar las deformaciones por completo que se obtuvieron, puesto que para una viga de 2 metros de claro no es aceptable una deformación de 21.64 mm de acuerdo con las NTC. Por lo anterior, se replican deformaciones alrededor del límite máximo aceptable, el cual es de 8.33 mm correspondiente

a un claro de 2 m. Las deformaciones máximas en el Modelo 3 son de 8.5996 mm, y en el Modelo 4 son de 8.2131 mm (Figura 30). Por la parte de los esfuerzos máximos principales, se tiene un valor de 276.88 MPa en el Modelo 3, y de 273.35 MPa en el Modelo 4 (Figura 31), valores que son bastante proporcionales.

Estos datos revelan una disminución de las deformaciones en un 4.49% y esfuerzos equivalentes de solo 1.27%, valores que son mucho menores a los obtenidos anteriormente en el marco de estudio. Lo anterior indica una menor eficiencia de rehabilitación o restauración de la capacidad portante de tan solo 4.7%. Por tanto, rehabilitar con laminados de fibra de carbono solamente en las uniones viga-columna es más de 3 veces menos eficiente que añadir estos LFC en el sofito de la viga.

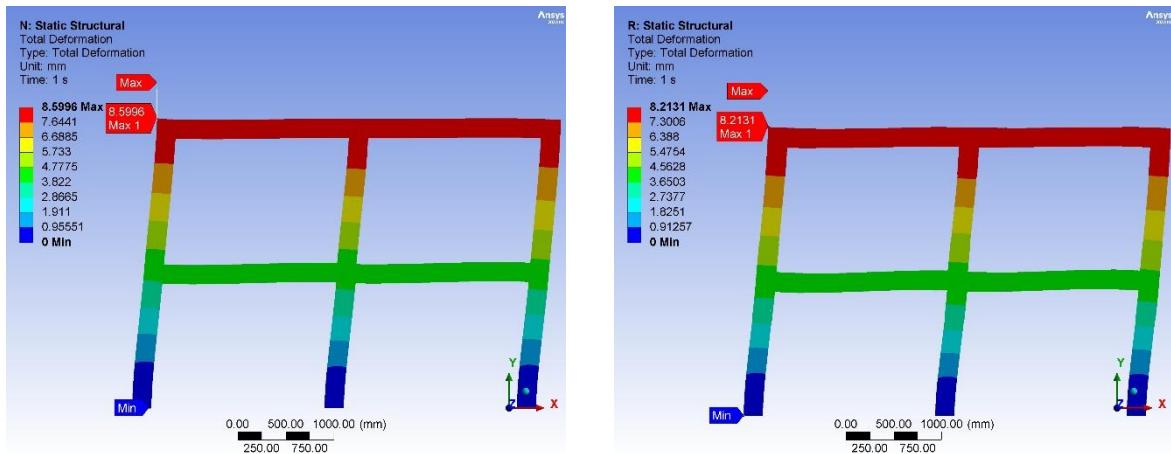


Figura 30. Deformaciones totales en los Modelos 3 y 4



Figura 31. Esfuerzos equivalentes en los Modelos 3 y 4

Por otro lado, aplicando el mismo sismo empleado para los Modelos 1 y 2, las deformaciones máximas por sismo son menores, dando valores de 2.9792 mm en el Modelo 3 (Figura 32) y de 3.7443 mm en el Modelo 4 (Figura 33). Esto implica que los efectos del sismo ocasionados sobre el marco son más notorios que las cargas laterales aplicadas previamente, dado que el aumento de las deformaciones es de un 25.68%. Otro dato para resaltar es el aumento de los esfuerzos equivalentes en un 25.67% propias del Modelo 4 respecto al Modelo 3, indicando que este tipo de rehabilitación es menos eficiente que aquella perteneciente al Modelo 2. Nótese que el aumento de las deformaciones y de esfuerzos equivalentes es bastante similar entre los Modelos 4 y 3.

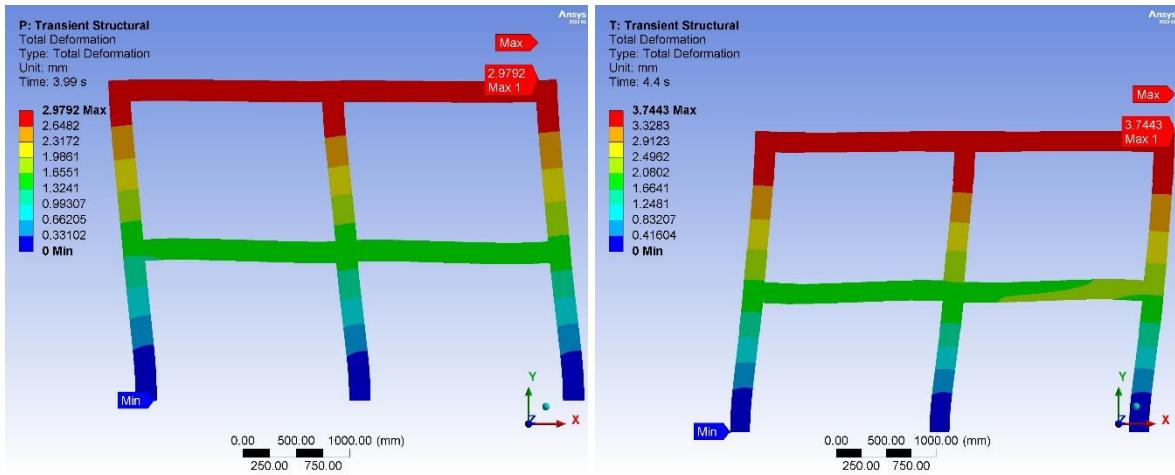


Figura 32. Deformaciones totales por sismo en los Modelos 3 y 4



Figura 33. Esfuerzos equivalentes por sismo en los Modelos 3 y 4

Por tanto, se puede determinar que el modelo de referencia se comporta peor ante el sismo una vez que se ha rehabilitado con LFC en las uniones viga-columna. No obstante, debe recordarse que en los Modelos 3 y 4 el dimensionamiento de los elementos es menor hasta en un 83% en el área gruesa, sus elementos son cuadrados de 1 solo tipo para el marco, y la resistencia a la compresión del concreto es un 40% mayor, respecto a los Modelos 1 y 2. Debajo se muestra en la Tabla 7 los resultados condensados de la deformación máxima y esfuerzo equivalente correspondientes de cada uno de los modelos analizados en el presente trabajo.

Tabla 7. Resultados de los modelos analizados

Marco de concreto de estudio				
Análisis gravitacional				
	Modelo 1 (A)	Modelo 2 (B)	Relación A/B	Relación B/A
Deformación (mm)	2.7028	2.3257	1.16214	0.86048
Esfuerzo equivalente (MPa)	66.127	95.287	0.69398	1.44097
Análisis sísmico				
	Modelo 1 (A)	Modelo 2 (B)	Relación A/B	Relación B/A
Deformación (mm)	4.4301	4.8122	0.92060	1.08625
Esfuerzo equivalente (MPa)	81.142	57.148	1.41986	0.70430
Marco de concreto de referencia				
Análisis gravitacional				
	Modelo 3 (C)	Modelo 4 (D)	Relación C/D	Relación D/C
Deformación (mm)	8.5996	8.2131	1.04706	0.95506
Esfuerzo equivalente (MPa)	276.88	273.35	1.01291	0.98725
Análisis sísmico				
	Modelo 3 (C)	Modelo 4 (D)	Relación C/D	Relación D/C
Deformación (mm)	2.9792	3.7443	0.79566	1.25681
Esfuerzo equivalente (MPa)	116.2	146.04	0.79567	1.25680

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos conducen a determinar el cumplimiento de la hipótesis inicial, puesto que el comportamiento del marco de concreto es mejor con la rehabilitación de fibra de carbono en cuanto a las deformaciones si se incluyen cargas gravitacionales, es decir que el Modelo 2 tiene menores deformaciones respecto al Modelo 1. No obstante, con la inclusión del análisis por sismo, estas deformaciones aumentan en el Modelo 2, aunque es importante señalar una disminución en los esfuerzos equivalentes. Esto demuestra una relación inversa en los esfuerzos y las deformaciones cuando se emplean laminados de fibra de carbono en las uniones viga-columna y el sofito de las vigas.

Lo anterior sugiere un mayor almacenamiento de fuerzas y menor liberación de energía en forma de desplazamientos. Esto es factible debido a la incorporación de laminados de fibra de carbono y las barras de acero. En el marco de referencia rehabilitado, la rehabilitación posee un menor impacto en cuanto a la disminución de las deformaciones, esto implica que el Modelo 4 mejora respecto al Modelo 3. Sin embargo, el análisis sísmico produce un comportamiento de aumento de deformaciones y esfuerzos equivalentes, contrario a la disminución observada en el análisis por cargas gravitacionales, aunque debe notarse que el porcentaje de aumento en las deformaciones de este tipo de rehabilitación en el marco de referencia es mayor que aquel propio de la rehabilitación en el marco de estudio.

Cabe destacar que la geometría y el refuerzo con acero de los elementos estructurales es diferente para las plantas de azotea y entrepiso en lo que respecta a vigas y columnas en los Modelos 1 y 2, algo que proporciona; mientras que tanto las columnas y vigas tienen una geometría cuadrangular en los Modelos 3 y 4. En añadidura a lo anterior, la resistencia del concreto es menor y las dimensiones son mayores en los Modelos 1 y 2 respecto a los Modelos 3 y 4.

Es necesario ejecutar una mayor cantidad de análisis con diferentes tipos de resistencias y dimensiones en los marcos de concreto, e incorporar otros materiales de rehabilitación. También es importante incorporar análisis experimentales para la verificación de los resultados obtenidos en el análisis computacional.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 440. (2012). *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures reported by ACI Committee 440*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute., & ACI Committee 440. (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. American Concrete Institute.
- Attari, N., Youcef, Y. S., & Amziane, S. (2019). Seismic performance of reinforced concrete beam–column joint strengthening by frp sheets. *Structures*, 20, 353–364. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.04.007>
- Barnes, R. A., & Mays, G. C. (1999). FATIGUE PERFORMANCE OF CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP PLATES. *JOURNAL OF COMPOSITES*, 3, 63–72.
- Blomfors, M., G. Berrocal, C., Lundgren, K., & Zandi, K. (2021). Incorporation of pre-existing cracks in finite element analyses of reinforced concrete beams without transverse reinforcement. *Engineering Structures*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111601>
- Blomfors, M., Lundgren, K., & Zandi, K. (2020). Incorporation of pre-existing longitudinal cracks in finite element analyses of corroded reinforced concrete beams failing in anchorage. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1782444>
- Chen, J. F., & Teng, J. G. (2001). ANCHORAGE STRENGTH MODELS FOR FRP AND STEEL PLATES BONDED TO CONCRETE. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 127, 784–791.
- Colombi, P., Fava, G., & Sonzogni, L. (2015). Fatigue crack growth in CFRP-strengthened steel plates. *Composites Part B: Engineering*, 72, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.036>

- De Boer, A., Hendriks, M. A. N., Den Uijl, J. A., Belletti, B., & Damoni, C. (2014). Nonlinear FEA guideline for modelling of concrete infrastructure objects. *Computational Modelling of Concrete Structures - Proceedings of EURO-C 2014*, 2, 977–985. <https://doi.org/10.1201/b16645-109>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA Report 273*.
- Garcia, R., Hajirasouliha, I., & Pilakoutas, K. (2010). Seismic behaviour of deficient RC frames strengthened with CFRP composites. *Engineering Structures*, 32(10), 3075–3085. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.05.026>
- Garden, H. N., & Hollaway, L. C. (1998). An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. *Composites Part B*, 29, 411–424.
- Ghafoori, E., Motavalli, M., Zhao, X. L., Nussbaumer, A., & Fontana, M. (2015). Fatigue design criteria for strengthening metallic beams with bonded CFRP plates. *Engineering Structures*, 101, 542–557. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.048>
- Gobierno de México. (2023). *Normas Técnicas Complementarias 2023*.
- Gotame, M., Franklin, C. L., Blomfors, M., Yang, J., & Lundgren, K. (2022). Finite element analyses of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement. *Engineering Structures*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114007>
- Hawileh, R. A., El-Maaddawy, T. A., & Naser, M. Z. (2012). Nonlinear finite element modeling of concrete deep beams with openings strengthened with externally-bonded composites. *Materials and Design*, 42, 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.004>
- Hollaway, L. C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. In *Construction and Building Materials* (Vol. 24, Issue 12, pp. 2419–2445). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>

- Imjai, T., Garcia, R., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2020). Strength degradation in curved fiber-reinforced polymer (FRP) bars used as concrete reinforcement. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 8). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/POLYM12081653>
- Imjai, T., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2009). Curved FRP as concrete reinforcement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering and Computational Mechanics*, 162(3), 171–178. <https://doi.org/10.1680/eacm.2009.162.3.171>
- Khalifa, A. M. (2016). Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1497–1505. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.033>
- Lee, M. G., Wang, W. C., Wang, Y. C., Hsieh, Y. C., & Lin, Y. C. (2022). Mechanical Properties of High-Strength Pervious Concrete with Steel Fiber or Glass Fiber. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050620>
- Liu, Y., Fan, L., Wang, W., Gao, Y., & He, J. (2023). Failure Analysis of Damaged High-Strength Bolts under Seismic Action Based on Finite Element Method. *Buildings*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/buildings13030776>
- Matheron, A., & Yang, J. (2021). A practical finite element modeling strategy to capture cracking and crushing behavior of reinforced concrete structures. *Materials*, 14(3), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ma14030506>
- Peng, H., Zhang, J., Shang, S., Liu, Y., & Cai, C. S. (2016). Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. *Engineering Structures*, 127, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.026>
- Rousakis, T., Anagnostou, E., & Fanaradelli, T. (2021). Advanced composite retrofit of rc columns and frames with prior damages—pseudodynamic finite element analyses and design approaches. *Fibers*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/fib9090056>

- Sharif, A., Ai-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., Baluch, M. H., & Ghaleb, B. N. (1994). Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates. *ACI Structural Journal*, 91(2), 160–168.
- Soutis, C., & Curtis, P. T. (2000). A method for predicting the fracture toughness of CFRP laminates failing by fibre microbuckling. *Composites*, 31. www.elsevier.com/locate/compositesa
- Tan, P., Tong, L., Steven, G. P., & Ishikawa, T. (2000). Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part I. Experimental investigation. *Composites. Part A*, 31, 259–271. www.elsevier.com/locate/compositesa
- Tanarslan, H. M. (2011). The effects of NSM CFRP reinforcements for improving the shear capacity of RC beams. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2663–2673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.016>
- University of Victoria. (n.d.). *Introduction to Finite Element Analysis (FEA) or Finite Element Method (FEM)*. Retrieved November 20, 2023, from https://www.engr.uvic.ca/~mech410/lectures/FEA_Theory.pdf
- Wang, L., Zhou, Y., Nagarajaiah, S., & Shi, W. (2023). Bi-directional semi-active tuned mass damper for torsional asymmetric structural seismic response control. *Engineering Structures*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116744>
- Wang, Y., Chen, W., Li, D., Xu, H., Zhang, F., & Guo, X. (2023). Experimental and Numerical Investigations of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames Strengthened with CFRP Sheets. *Buildings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092195>
- Wattanapanich, C., Imjai, T., Garcia, R., Rahim, N. L., Abdullah, M. M. A. B., Sandu, A. V., Vizureanu, P., Matasaru, P. D., & Thomas, B. S. (2023). Computer Simulations of End-Tapering Anchorages of EBR FRP-Strengthened Prestressed Concrete Slabs at Service Conditions. *Materials*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/ma16020851>

Yang, J., Haghani, R., Blanksvärd, T., & Lundgren, K. (2021). Experimental study of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement. *Construction and Building Materials*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124076>

Yang, J., Liang, S., Zhu, X., Dang, L., Wang, J., & Tao, J. (2021). Experimental research and finite element analysis on the seismic behavior of CFRP-strengthened severely seismic-damaged RC columns. *Structures*, 34, 3968–3981. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.015>

You, Y. J., Park, Y. H., Kim, H. Y., & Park, J. S. (2007). Hybrid effect on tensile properties of FRP rods with various material compositions. *Composite Structures*, 80(1), 117–122. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.04.065>

Zhu, W., Li, M., Qin, H., Fu, F., & Liu, F. (2020). Behavior of RC beams strengthened using steel-wire-carbon-fiber-reinforced plates. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/ma13183996>