



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRUEBAS EXPERIMENTALES DE UNA CONEXIÓN
TRABE-COLUMNA REHABILITADA CON
CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Eduardo Martínez Aguilar

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, CDMX, 2021

DEDICATORIAS

A mis padres; Luis Martínez y Esthela G. Aguilar, por haberme forjado como la persona que soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este, me formaron con reglas y muchas libertades, pero al final de cuentas, siempre me motivaron y me dieron un buen ejemplo.

A mis hermanos; Ana Karen, Héctor y Monserrat, que me han acompañado a lo largo de este camino, ofreciéndome amor, apoyo y comprensión.

A mi tío; Charly por apoyarme en todo momento, por todos esos consejos y por ser un ejemplo para mí en todos los aspectos.

A mi familia por brindarme apoyo, una palabra de aliento y estar ahí cuando los he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería por permitir desarrollarme profesionalmente, por los conocimientos académicos, culturales que me han brindado durante esta etapa y por todas las experiencias que me ha dejado.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por todos los conocimientos, apoyo y facilidades que se me brindaron.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por las facilidades brindadas para realizar los experimentos, a ITISA por donar los especímenes de prueba; y a Granding International por realizar la rehabilitación del espécimen ensayado.

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla por impulsar mi desarrollo académico y profesional, gracias por la paciencia, apoyo, por las enseñanzas y consejos que me ha brindado y principalmente gracias por su amistad y confianza.

A mis padres, mis hermanos, familia y amigos, por siempre estar ahí cuando lo he necesitado, especialmente a mis primos por todos esos consejos y experiencias que hemos compartido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), mediante el proyecto FORDECyT No. 297246 “Desarrollo de capacidades nacionales para aumentar la resiliencia sísmica de edificios de concreto y mampostería con un enfoque de diseño por desempeño”.

Y finalmente agradezco a mi hermano Héctor Martínez, porque sin tu ayuda esto no hubiera sido posible, gracias hermano por todos esos momentos de risas y locuras, por estar conmigo en las buenas y sobre todo en las malas. Gracias por tu apoyo y cariño.

RESUMEN

En esta tesis se muestran los resultados del comportamiento experimental de una conexión trabe-columna, rehabilitada con concreto reforzado con fibra de acero (CRFA) sujeta a carga cíclica reversible. La conexión fue inicialmente ensayada sin daño, provocando un daño considerable en el espécimen. Se realizó la rehabilitación del elemento para comparar y analizar el comportamiento de la conexión nueva y rehabilitada. Los dos ensayos fueron realizados en el laboratorio de estructuras grandes de CENAPRED. La rehabilitación fue hecha por la empresa Granding International, SA de CV.

Se muestran el proceso de rehabilitación que se llevó a cabo en el espécimen y los resultados obtenidos de las pruebas. Se presentan curvas carga-desplazamiento y curvas de energía disipada. Se realiza una comparación del nivel de agrietamiento, con respecto a la distorsión. También, se comparan otros parámetros de interés. Con base en los resultados obtenidos, se discute la factibilidad de realizar este tipo de rehabilitación cuando intervienen más elementos dentro de un edificio. Por último, se ofrecen conclusiones.

ABSTRACT

This thesis shows experimental result of a beam-column connection rehabilitated with steel fiber reinforced concrete (SFRC). The connection was initially tested to cause considerable damage in the specimen. The rehabilitation was conducted to compare and analyze the connection's behavior new and rehabilitated. Both tests were conducted in the big structures laboratory of CENAPRED. The rehabilitation was done by Granding International SA de CV.

The rehabilitation process is presented along with the results obtained from the tests, in terms of load-displacement and dissipated energy curves. A comparison between the level of cracking and drift is presented. Other significant parameters are also compared. Based on the results, feasibility of the rehabilitation technique is discussed. Lastly, conclusions are offered.

CONTENIDO

DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	V
INTRODUCCIÓN	VIII
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Antecedentes	3
1.1.1 Sismicidad en México	3
1.1.2 Regiones sísmicas en México	4
1.1.3 Tipo de edificaciones en la Ciudad de México	5
1.1.4 Daños en estructuras de concreto	7
1.1.5 Fibras de acero.....	8
1.1.6 Uso de fibras en el concreto	10
1.2 Justificación.....	11
1.3 Alcances	11
1.4 Objetivos.....	12
CAPÍTULO II	13
CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (CRFA).....	13
2.1 Antecedentes	14
2.2 Consideraciones de diseño para concreto armado de fibra de acero.....	14
2.2.1 Resistencia a la flexión.....	14
2.2.2 Resistencia al corte	16
2.2.3 Resistencia a la compresión.....	16
2.2.4 Resistencia a la tensión.....	16
2.2.5 Tenacidad y resistencia al impacto	17
CAPÍTULO III	18
PRUEBAS EXPERIMENTALES	18
3.1 Configuración del experimento	19

3.1.1	Arreglo experimental.....	19
3.2	Instrumentación.....	24
3.3	Protocolo de carga	26
3.4	Proceso de rehabilitación.....	27
<i>CAPÍTULO IV</i>		<i>35</i>
<i>RESULTADOS EXPERIMENTALES</i>		<i>35</i>
4.1	Agrietamiento	36
4.2	Curvas carga desplazamiento.....	40
4.3	Curvas de energía.....	43
<i>CAPÍTULO V</i>		<i>44</i>
<i>DISCUSION DE REHABILITACION DE TRABES CON LOSA DE CONCRETO.....</i>		<i>44</i>
5.1	Rehabilitación con fibras de carbono.....	45
5.2	Rehabilitación con concreto reforzado	46
5.3	Discusión	46
<i>CAPÍTULO VI</i>		<i>47</i>
<i>CONCLUSIONES.....</i>		<i>47</i>
6.1	Conclusiones	48
6.2	Recomendaciones	48
<i>REFERECIAS</i>		<i>49</i>

INTRODUCCIÓN

Las trabes, columnas y sus conexiones son elementos críticos en una estructura a base de marcos, ya que soportan las cargas y las transmiten a la cimentación. Por esta razón, es importante que estos elementos se encuentren en buen estado, porque de éstos depende la seguridad de las personas. Si por algún motivo alguno de estos elementos se llega a dañar, es conveniente realizar alguna solución inmediata para rehabilitar el elemento. La rehabilitación debe recuperar o de preferencia mejorar el comportamiento del elemento.

En México, que está situado en una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo, los daños por sismos observados en el pasado han sido cuantiosos, en especial en las estructuras de concreto. Afortunadamente, estos daños pueden ser reparados, pues existen algunas técnicas para reforzar las estructuras. Sin embargo, es necesario evaluar de manera experimental el comportamiento de la rehabilitación utilizada para asegurar su buen desempeño.

Los métodos para reforzar o rehabilitar estructuras son diversos, y la elección del sistema depende de varios factores. Para este estudio se utilizó un sistema de rehabilitación con concreto reforzado con fibra de acero (CRFA).

En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizados a una conexión trabe-columna. La conexión fue ensayada sin daño inicial. Después, esta fue rehabilitada con concreto reforzado con fibras de acero (CRFA).

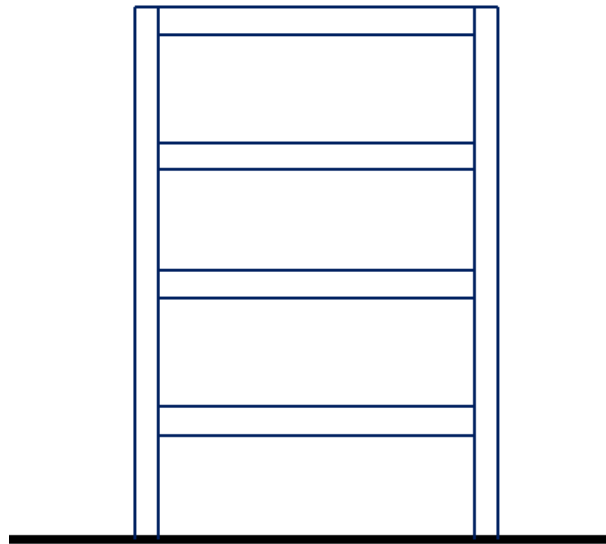
En la prueba de la conexión original se observó que el concreto cerca de la conexión se había desconchado, y el acero de refuerzo quedó expuesto. Entonces se decidió realizar la rehabilitación de la conexión con CRFA, ya que era de interés conocer y analizar, a través de las pruebas, el comportamiento del espécimen una vez rehabilitado.

Para poder evaluar el sistema de rehabilitación basado en CRFA, fue necesario someter al espécimen a acciones tanto nuevo como rehabilitado. La configuración de la prueba y la instrumentación fue la misma en ambos casos.

Al final, se observó que el sistema de rehabilitación utilizado fue capaz de recuperar y aumentar la capacidad de carga y rigidez de la conexión ensayada. También, se evaluaron experimentalmente las características que aportan las fibras.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



1.1 Antecedentes

1.1.1 Sismicidad en México

México se sitúa en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo (Pacheco, 1999). Esto se debe a que se encuentra en un área conocida como el cinturón circumpacífico, conocido como “cinturón de fuego”, que rodea casi todo el pacífico y que se extiende a lo largo de las costas de América del sur, México, California y Alaska, hasta Japón y las Indias orientales. En México interactúan cinco placas tectónicas (Figura 1): norteamericana, Caribe, Cocos, Pacífico y Rivera. La mayor parte de la energía sísmica se libera en esta región.

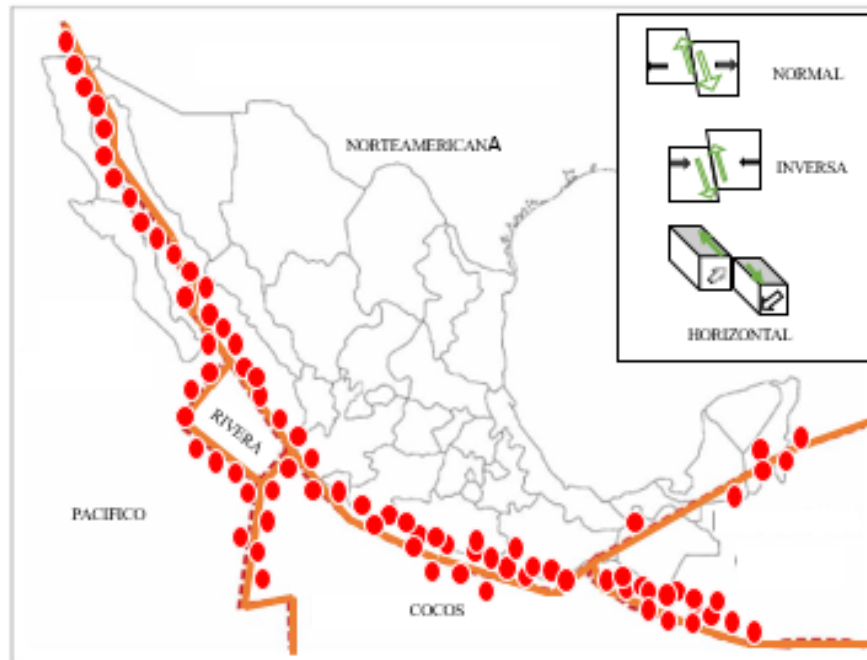


Figura 1. Placas tectónicas y tipos de fallas (adaptada de Geofísica UNAM, 1999)

Por esta razón, las placas tectónicas, se mueven en diferentes direcciones produciendo roces y choques entre ellas. Es por esto que la placa norteamericana se separa de la del Pacífico, pero esto provoca que roce con la del caribe y choque contra la de Rivera y la de Cocos. Al chocar frontalmente con estas últimas dos placas se genera lo que se denomina zona de subducción. Por lo anterior, los estados con mayor sismicidad son: Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Colima y Jalisco, pero, debido a esta acción, también son afectados los estados de Veracruz, Tlaxcala, Morelos, Puebla, Nuevo León, Sonora, Baja California y la Ciudad de México.

Aunque las zonas epicentrales se localizan principalmente en el Pacífico, los movimientos causan daños severos en la Ciudad de México. Esto debido a la naturaleza del terreno, ya que la ciudad está sobre lo que un día fuera un lago.

1.1.2 Regiones sísmicas en México

Las regiones se clasifican en función de la cantidad de sismos que se presentan. Como se mencionó anteriormente, la zona de mayor actividad sísmica del país se encuentra en las costas del Pacífico. Con ayuda de los registros sísmicos de las redes de detección instaladas en el territorio mexicano, se realizó la clasificación de las cuatro regiones sísmicas de México (CFE, 2008). Las cuatro regiones se describen con la ayuda de la Figura 2.

- La **zona A**, es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
- Las **zonas B** y **C** son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.
- La **zona D** es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.



Figura 2. Regionalización sísmica de la República Mexicana (adaptada de CFE, 2008)

México es considerado un laboratorio sismológico. Esto debido que a lo largo de la historia se han presentado sismos devastadores de los cuales se harán mención de algunos (Cruz, 2017):

- El sismo más grande en México ocurrió el día 28 de marzo de 1787 a las 11:00 horas. Tuvo epicentro en las costas de Oaxaca, con una magnitud de 8.6 grados. Generó un gran tsunami en las costas de Oaxaca, pero el número de víctimas fue bajo, ya que en ese entonces las costas no se encontraban pobladas (Meza, 2015).
- El sismo de Acambay ocurrió el día 19 de noviembre de 1912 a las 7:12 horas, con epicentro en Acambay, Estado de México. Tuvo una magnitud de 7 grados.

-
- El Sismo de Xalapa ocurrió el día 3 de enero de 1920 a las 05:46 horas. Tuvo epicentro en Xalapa, Veracruz y una magnitud de 6.4 grados. Este sismo provocó las muertes de más de 600 personas ocasionadas por deslaves. Es considerado como el segundo con más decesos en la historia de México.
 - El llamado sismo del Ángel sucedió el día 27 de julio de 1957 a las 02.44 horas. Su epicentro se ubicó al sureste de Acapulco, con una magnitud de 7.8 grados. Es llamado así, porque el sismo provocó la caída del Ángel esa madrugada.
 - El sismo del 19 de septiembre de 1985 ocurrió a las 7:19 horas, con magnitud de 8.1 grados y epicentro en las costas de Michoacán. A pesar de ocurrir muy lejos de la capital, fue aquí donde se tuvieron los mayores daños y pérdidas de vidas humanas. Se menciona oficialmente que fueron 5,000 personas las que perdieron la vida, y cerca de 50,000 heridos, más de 770 edificios colapsados o severamente dañados (Meza, 2015).
 - El sismo del 15 de junio de 1999 ocurrió en Puebla. Tuvo magnitud de 7 grados. El sismo del 30 de septiembre ocurrió el mismo año, pero con magnitud de 7.5 grados y epicentro en Oaxaca.
 - El día 20 de marzo de 2012 ocurrió un sismo que tuvo una gran cantidad de réplicas, con epicentro en Ometepec, Guerrero y magnitud de 7.5 grados. El distintivo principal de este sismo fueron la cantidad de réplicas registradas, con magnitud mayor a 4.5 durante los 30 días posteriores.
 - El sismo del 19 de septiembre de 2017 ocurrió en Puebla a las 13: 14 horas. Tuvo una magnitud de 7.1 grados. Las cifras oficiales que dejó el sismo fue de 369 muertos de las cuales 228 fueron en la Ciudad de México, casi 40 edificios colapsados y 5,765 viviendas dañadas.

Debido a estos eventos y a los daños que causan, la ingeniería estructural y sísmica ha cobrado mucha relevancia, ya que es necesario mejorar los diseños para que en este tipo de eventos no se pierdan vidas y tampoco la infraestructura existente.

1.1.3 Tipo de edificaciones en la Ciudad de México

El reglamento de la Ciudad de México clasifica las estructuras en dos grupos A y B. Cada uno de ellos se divide en dos subgrupos. El grupo A se refiere de forma general a aquellas edificaciones que al fallar estructuralmente podrían ocasionar el deceso de un elevado número de vidas humanas, tales como hospitales, aeropuertos, escuelas, etc. El grupo B hace referencia a edificaciones comunes como viviendas, oficinas, locales comerciales, etc.

Los tipos más comunes de sistemas estructurales en edificios en la Ciudad de México son (ICA, 1998):

- **Marcos de concreto resistente a momentos.** Estos consisten en vigas y columnas como el sistema que resiste las fuerzas verticales y laterales. El sistema de piso es una losa de

concreto reforzado apoyado directamente en los marcos. Por lo general las losas son de 10 a 15 cm.

- **Sistema de losa nervada.** Consisten en columnas de concreto reforzado que soportan la losa nervada con un espesor de 24 a 45 cm (Figura 3). La losa nervada tiene una zona rígida en la conexión losa-columna. Este sistema fue muy practicado en el Distrito Federal, ahora Ciudad de México debido a su facilidad de construcción.

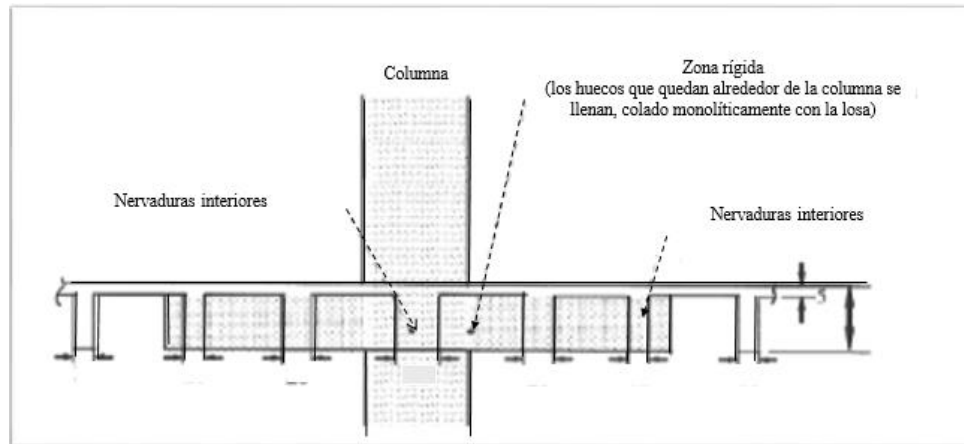


Figura 3. Sección común de una losa nervada (adaptada de Aguilar, 1996)

- **Losas de vigas-bloque.** Este sistema es muy popular en México debido a que es muy económico y fácil de construir. Consiste en vigas presforzadas prefabricadas que se utilizan de soporte para los bloques huecos de cemento-arena con espacios entre las vigas (Figura 4). Se cuela una losa de concreto reforzado de 5 cm en la parte superior de las vigas y los bloques, formando un diafragma rígido que puede transmitir las fuerzas a los elementos que soportan las cargas laterales. Los costos se reducen porque la losa se puede colar directamente encima de las vigas y los bloques, sin un cimbrado o apuntalamiento.

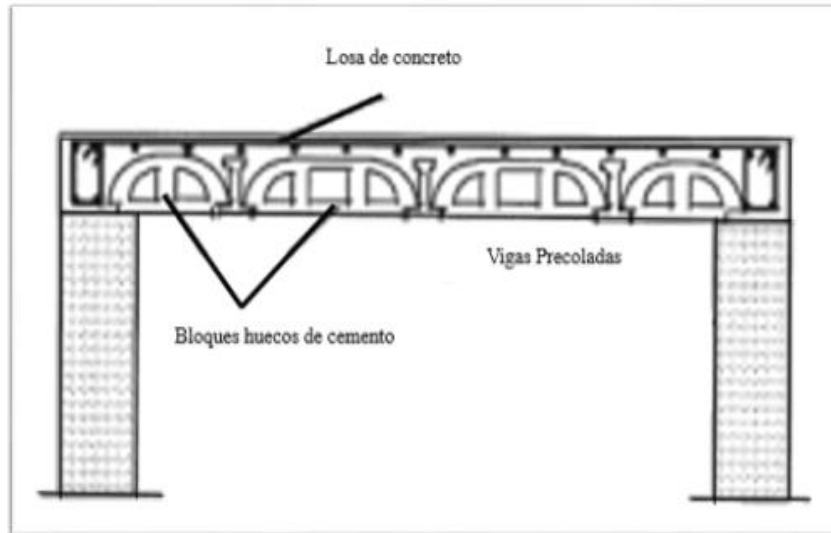


Figura 4. Sistema de losa viga-bloque (adaptada de Aguilar, 1996)

1.1.4 Daños en estructuras de concreto

Lo daños que se presentan en las estructuras se deben principalmente a sismos, procesos constructivos, el estado del material con el que fue construido y al terreno donde está situada la estructura. Se sabe que una gran parte de las edificaciones que existen en la Ciudad de México fueron construidas a mediados del siglo pasado. Es por ello que las estructuras tienen deficiencias, pues en aquella época no existían normas de diseño sísmico rigurosas.

Cuando se presenta un evento sísmico, el error más frecuente que se observa en las estructuras dañadas es discontinuidad en el refuerzo longitudinal en vigas y columnas, además de una amplia separación del refuerzo transversal (Soto, 2008).

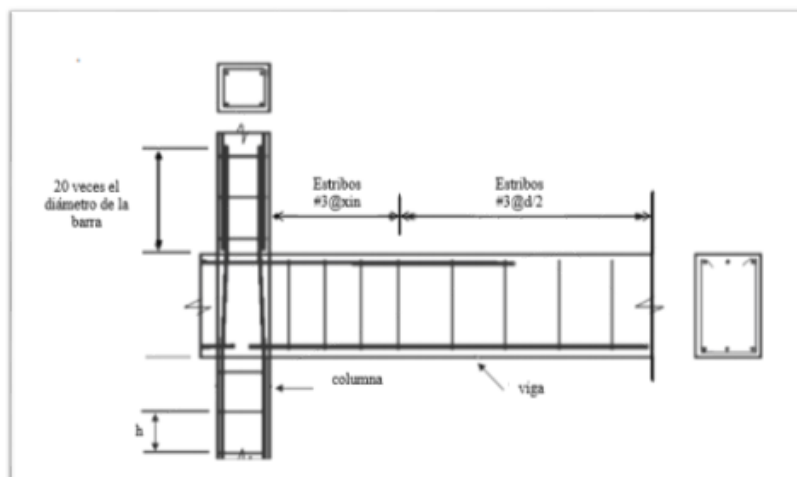


Figura 5. Detallado común en edificios de concreto construidos a mediados de siglo pasado (adaptada de Moehle, 2000)

Los daños más frecuentes en elementos de concreto se resumen a continuación:

Daño en vigas

Las fallas más recurrentes que se pueden observar son:

- Agrietamiento diagonal cerca de la conexión viga-columna
- Aplastamiento del concreto cerca de la conexión debido a las grandes fuerzas de flexión inducidas por el sismo
- Desconchamiento del concreto, como consecuencia del pandeo del refuerzo longitudinal o porque se excedió la capacidad del concreto.

Daño en columnas

Las fallas más comunes en columnas son:

- Agrietamiento diagonal a la mitad de su altura debido a las fuerzas de cortante. Las grietas formaron patrones cruzados debido a las deformaciones cíclicas a las que están sujetas las columnas
- Otra causa común de falla en columnas es la llamada falla por columna corta. La contribución de los muros no estructurales a la rigidez lateral del edificio es perjudicial en los casos donde el muro se extiende parcialmente por la altura del entrepiso entre la columna ya que reduce la longitud libre de la columna e incrementa su rigidez efectiva y, por lo tanto, atrae más fuerza cortante.

Daño en losas

La mayoría de los daños registrados en estos elementos son grietas por tensión diagonal en la losa alrededor de los apoyos y sugieren una falla incipiente por punzonamiento.

Daño en uniones viga-columna

Los daños que se presentan son agrietamiento y desconchamiento del concreto en uniones donde no existe refuerzo transversal. Esto se genera por un inadecuado confinamiento en las uniones agravado por la práctica de utilizar paquetes de barras longitudinales en las esquinas de la columna lo cual incrementa el desconchamiento en la unión.

1.1.5 Fibras de acero

Las fibras pueden ser producidas de muchos materiales, y cada una tiene propiedades diferentes. La ASTM clasifica a las fibras en tres tipos: fibras minerales (vidrio, asbesto), fibras orgánicas (nylon, polietileno), y, fibras metálicas (acero).

Las fibras metálicas, o mejor conocidas como fibras de acero, son elementos delgados de longitud corta y diámetro pequeño, en comparación a su longitud. El uso de este material como refuerzo en el concreto es cada vez es más frecuente en México. Las aplicaciones más comunes que se le dan son en pisos industriales, para la estabilización de taludes a través de concreto lanzado y lineamiento de túneles.

Se fabrican a partir de alambre trefilado de acero bajo en carbono y su característica principal es su elevado límite elástico. En ciertos casos se puede llegar a sustituir por completo el armado tradicional del concreto reforzado por fibras (Soto, 2008).

Según su aplicación las fibras pueden ser producidas por diferentes métodos y en diferentes formas, como se muestra en la Figura 6.

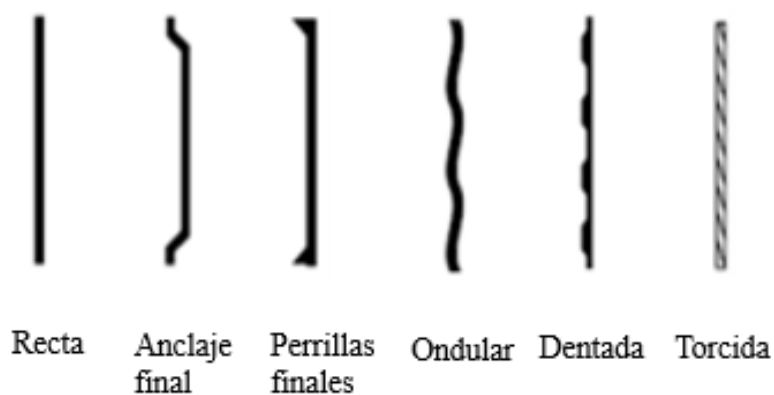


Figura 6. Formas geométrica de las fibras(adaptada de Marmol, 2010)

En la Tabla 1 se muestran las propiedades de las fibras más comunes en el mercado. Las fibras de vidrio, de carbono y de acero son las que más se utilizan en combinación con el concreto simple.

Tabla 1. Propiedades de fibras más comunes (adaptada de ACI 544.5R-10, 2010)

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m^3)	Resistencia a Tracción (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	8.3	11.13
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

Las fibras de acero incrementan notablemente el comportamiento dúctil del concreto. También se puede observar un incremento a la resistencia a la fatiga, aumenta la resistencia a cortante y

al impacto. Esto quiere decir que las fibras mejoran significativamente las propiedades del concreto simple, (López, 2015).

Los beneficios de las fibras pueden ser muy efectivos, dependiendo del tipo de fibra metálica que se utilice y de las características tanto físicas como mecánicas. Los aspectos físicos más relevantes son: el anclaje, que depende de la forma que tenga en los extremos la fibra, dosificación y lo que se define como relación de aspecto (longitud dividida entre el diámetro). Entre mayor longitud tenga la fibra, mejor será la relación de aspecto y por lo tanto la fibra podrá tener un mejor desempeño, pero la trabajabilidad es el factor que limita la longitud de la fibra.

En el siguiente capítulo se aborda el tema del concreto reforzado con fibras de acero. Se explican de forma detallada los beneficios de las fibras en comparación con el concreto simple.

1.1.6 Uso de fibras en el concreto

El uso de las fibras en la construcción no es algo nuevo, existen evidencias de que en Babilonia y Egipto las fibras vegetales se combinaron con mezclas de arcilla (Dávila, 2010). Tiempo después ese sistema de construcción se dejó de usar y fue hasta el siglo XX donde se retomó, pero con un estudio técnico, sobre la adición de fibras de hierro, yute y otras fibras naturales (Dávila, 2010).

Graham (1911) utilizó las fibras para incrementar la resistencia y estabilidad del concreto convencional (Orbe, 2015). A partir de ese momento comenzaron aparecer patentes de concreto reforzado con fibras de diversos materiales.

En los años 50 se realizaron numerosos trabajos de investigación, donde destacan los de Romualdi (1963). Se puede decir que a partir de este momento se comenzó con la verdadera investigación científica de concreto reforzado con fibras. Su trabajo está basado principalmente en fibras naturales. La única deficiencia que se le encontró al uso de fibras naturales es la poca durabilidad, ya que podían ser atacadas por microorganismos, así que se optó por el uso de fibras sintéticas.

En la actualidad el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, cuenta con el comité 544 para el estudio y análisis de los concretos reforzados con fibras, (CRF). Impulsado por este comité y otros más, el CRF ha ganado terreno en la industria de la construcción.

En esta tesis se explora el concreto reforzado con fibras de acero como material de rehabilitación. Los resultados muestran que el CRFA resulta efectivo para recuperar las propiedades de una conexión dañada.

1.2 Justificación

México es un país proclive a los desastres naturales como: ciclones, inundaciones o sismos. Este último se debe a que México se sitúa en una región altamente sísmica, lo que lo convierte en un país vulnerable a los efectos de los terremotos. Las consecuencias dependen principalmente de la magnitud del sismo y la ubicación del epicentro. Los problemas que se llegan a suscitar después de un evento como los terremotos pueden ser económicos, sociales y ambientales.

Después de un sismo, una de las mayores consecuencias es la eventual destrucción o daño de edificaciones. Esta situación trae consigo innumerables pérdidas económicas, ya que es necesario la reconstrucción de viviendas, edificios y demás daños que hayan ocurrido.

La población es la que sufre los estragos de estos eventos, principalmente por la cantidad de pérdidas humanas y materiales, por ver interrumpidas las actividades cotidianas, lo que impacta principalmente el desarrollo económico de la población. Por esta razón se ha trabajado en emplear nuevas tecnologías y desarrollarlas para ofrecer a la sociedad mayor seguridad, tanto para la protección de sus vidas, como de sus bienes materiales.

Una de las actividades más empleadas después de un sismo para recuperar la funcionalidad de la sociedad es la rehabilitación y reforzamiento de estructuras, que es en muchas ocasiones la mejor opción, económicamente hablando. Esta actividad no necesariamente se debe utilizar sólo cuando la estructura ya está dañada; también, puede ser aplicada a estructuras que hayan sido diseñadas en décadas pasadas, cuando las normas de diseño no eran tan estrictas. También, la rehabilitación se puede usar para incrementar la capacidad sísmica de los edificios.

Por esta razón, en la presente tesis se describe el proceso de rehabilitación de una conexión trabe-columna dañada, para poder evaluar, en este caso, el proceso de rehabilitación y las dificultades que se pudieran enfrentar. Esto con la intención de conocer la capacidad de respuesta de estos elementos al ser rehabilitados con concreto reforzado con fibras de acero (CRFA).

1.3 Alcances

En esta tesis se reportan los resultados de un experimento realizado en una conexión trabe-columna.

La conexión fue ensayada para imponer daño inicial. Después, el espécimen fue rehabilitado y ensayado nuevamente. En este trabajo se describe el proceso de rehabilitación y los resultados encontrados.

Se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones para futuros estudios.

1.4 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es evaluar el comportamiento experimental de una conexión trabe-columna rehabilitada con mortero reforzado con fibras de acero.

Los objetivos particulares son:

- Dar a conocer el sistema de rehabilitación usado en la conexión trabe-columna.
- Estudiar el comportamiento que tienen las fibras de acero en conjunto con el concreto simple.
- Describir el comportamiento del espécimen rehabilitado, evaluando detalladamente si se alcanzó o mejoró el comportamiento del espécimen original.
- Evaluar si el sistema de rehabilitación usado es una opción factible para el reforzamiento de elementos estructurales dañados.
- Comparar los resultados obtenidos de la conexión original y la rehabilitada.

CAPÍTULO II

CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (CRFA)



2.1 Antecedentes

El concreto es uno de los materiales más usados en la construcción, por esta razón, a través del tiempo, se ha hecho investigación para mejorar sus propiedades. El concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) se ha venido estudiando desde mediados del siglo XX (Hernández, 2011). Cada día este material es más usado, ya que han venido revolucionando el mercado, con su costo bajo y propiedades que actúan de manera estructural. Esto se debe a que la adición de fibras en el concreto mejora las características de tenacidad, control de agrietamiento, resistencia al impacto y otras características.

2.2 Consideraciones de diseño para concreto armado de fibra de acero

2.2.1 Resistencia a la flexión

Para la poder predecir la resistencia a la flexión en vigas con fibras de acero, se han desarrollado varios métodos. Estos métodos pueden ser empíricos o dados los resultados de pruebas de laboratorio. En otros métodos se utiliza el área de enlace de la fibra o la ley de las mezclas (Aguilar, 1996)

Henager y Doherty en (1976) desarrollaron un método para poder predecir la resistencia de vigas reforzadas con barras y fibras: Este método es similar al de diseño de fuerza última del ACI (1989), es decir, se añade la aportación del concreto fibroso con el aporte del refuerzo con barras para poder obtener el momento definitivo.

La hipótesis de diseño hecha por Henager y Doherty (1976) se muestra en la Figura 7. Además, la ecuación 1 permite calcular el momento nominal de una viga reforzada con barras y fibras de acero.

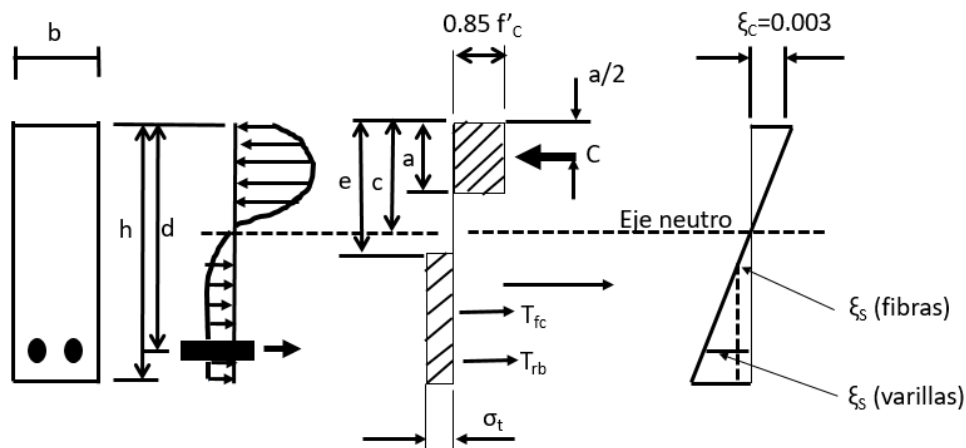


Figura 7. Hipótesis de diseño para el diseño de vigas de concreto reforzado con fibras de acero (adaptada de Henager y Doherty, 1976)

El comité del Instituto Americano del concreto (ACI 318, 1989) utiliza la Figura 7 y simplifica la distribución de esfuerzo. Se propone una distribución rectangular, con una profundidad igual a β_1 veces la distancia del eje neutro. Se asume que el elemento alcanza su resistencia a la flexión máxima a una deformación unitaria del concreto en compresión igual a 0.003, con una distribución lineal de deformaciones unitarias.

Basado en las afirmaciones anteriores, y en la Figura 7, se puede ver que este método es muy parecido al método de flexión simple del ACI 318b (2002), pero con la adición de la resistencia que proporcionan las fibras.

La ecuación (1), realizada por Henerager y Doherty permite obtener el momento resistente.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (h - e) \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

Donde A_s es el área de refuerzo en tensión,

f_y es el límite de elasticidad del refuerzo,

d es distancia de la fibra de compresión extrema al centroide del refuerzo a tensión,

a es la profundidad del bloque de tensión rectangular,

b es el ancho de la trabe,

h es la profundidad total de la trabe, y

σ_t es la resistencia a tensión del concreto con fibras según la ecuación 2.

$$\sigma_t = 0.00772 \frac{l}{d_f} \rho_f F_{be} \quad (\text{unidades SI, MPa}) \quad (2)$$

Donde:

l es la longitud de la fibra,

d_f es el diámetro de la fibra,

p es el porcentaje por volumen de las fibras de acero,

F_{be} es el factor de eficiencia de la fibra, y varía de 1 a 1.2, depende de las características de la fibra,

e es la distancia del extremo del bloque de compresión al bloque de tensión que se calcula con la ecuación 3

$$e = [\varepsilon_s (\text{fibras}) + 0.003] \left(\frac{c}{0.003} \right) \quad (3)$$

Donde:

ϵ_s es el módulo de elasticidad del acero,

c es la distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, que se encuentra al igualar las fuerzas de tensión y compresión.

Como se puede observar en la ecuación (1) el primer término hace referencia a la resistencia aportada por las barras de acero y en el segundo lo aportado por las fibras de acero.

2.2.2 Resistencia al corte

Existen información donde se indica que las fibras pueden aumentar sustancialmente la resistencia al corte, pero este aumento se debe principalmente a la cantidad en volumen de fibras presente en el concreto (López, 2015).

También, las fibras con extremos deformados aumentan la resistencia al corte lo suficiente para cambiar el modo de falla a tensión (Willimson, 1978)

En otros ensayos se ha demostrado que el aumento de la resistencia a cortante depende de la técnica de ensayo y la alineación de las fibras en la zona de falla. Para 1% en volumen de fibras, los aumentos van desde insignificantes hasta un 30% con respecto a un concreto simple (López, 2015).

Criswell (1976) realizó una serie de pruebas donde mostraron aumento en la capacidad de corte. Cabe señalar que estas pruebas se hicieron con un porcentaje de fibras del 1% y los resultados arrojaron un aumento de hasta el 20% más de resistencia al corte.

2.2.3 Resistencia a la compresión

En cuanto a la resistencia a la compresión, ACI 544 (2008) reporta que las fibras no aportan algún incremento o decremento significativo, pero cabe recalcar que sí se producen ligeras variaciones. Estas variaciones dependen directamente de la relación de aspecto y el porcentaje en volumen de fibras presentes. El aumento a compresión va desde 0 a 15% con respecto a concretos sin refuerzo de fibras (ACI 544, 2008)

2.2.4 Resistencia a la tensión

Una limitación que siempre ha tenido el concreto simple es su resistencia a la tensión. Las fibras han eliminado esta limitación ya que las presencias de éstas en los concretos tienden a aumentar en gran medida la resistencia a tensión. Este aumento depende, como en todas las características ya mencionadas, de la cantidad de fibras. Además, dependen principalmente de la capacidad de adherencia que se dé entre la fibra y el concreto (López, 2015).

2.2.5 Tenacidad y resistencia al impacto

En cuanto a la tenacidad, también se observa un incremento. Este incremento se debe a la cantidad de fibras, el tipo y la relación de aspecto.

Con respecto a la resistencia al impacto, va de la mano con la tenacidad, ya que aumenta esta capacidad hasta 10 veces más, que un concreto simple. Esto debido a su gran capacidad de absorción de energía (ACI 544, 2008).

CAPÍTULO III

PRUEBAS EXPERIMENTALES



3.1 Configuración del experimento

3.1.1 Arreglo experimental

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de estructuras grandes de CENAPRED. En la Figura 8 se muestra el arreglo general del experimento. Se puede ver que el espécimen se apoyó sobre dos placas y se ancló mediante barras, placas y tuercas de acero. Es importante destacar que, por simplicidad de las pruebas, la trabe se colocó verticalmente; mientras la columna se colocó de manera horizontal.

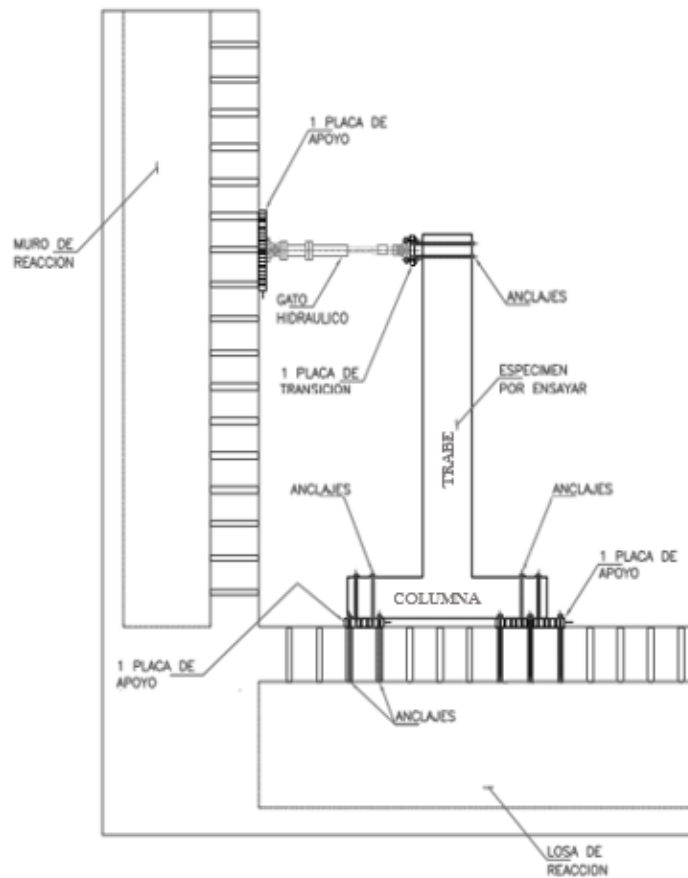
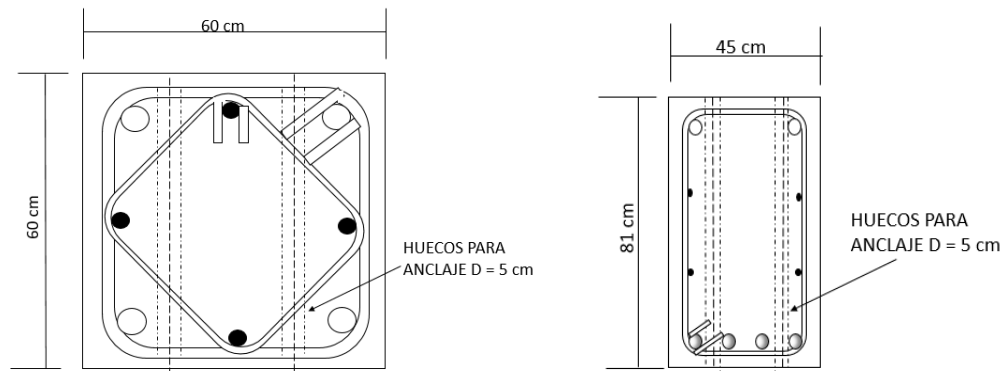


Figura 8. Esquema general de prueba

Las cargas se aplicaron mediante un gato hidráulico, que se ancló en una placa de acero, que a su vez estaba anclada y tensada con barras y tuercas al muro de reacción. El gato hidráulico era el encargado de aplicar la fuerza en la punta de la trabe, como se observa en la Figura 8.

El espécimen ensayado tuvo las propiedades mostradas en las figuras 9 a 11. La sección de la columna era cuadrada de 60 x 60 centímetros. Tuvo refuerzo longitudinal con cuatro varillas del #8 y cuatro varillas del #12. Sus estribos fueron del #3 espaciados a cada 15 centímetros. Con

respecto al acero de refuerzo longitudinal de la trabe, se realizó una distribución no simétrica, ya que en el lecho superior y el inferior se colocaron 2 varillas de #12 y 4 del #8, respectivamente. La separación de los estribos de la trabe fueron 30 cm. Su sección transversal fue de 45 x 81 cm. La longitud total de la trabe fue de 5 m y la de la columna 3.40 m.



a) Sección transversal de la columna b) sección transversal de la trabe
 Figura 9. Geometría y distribución de acero de refuerzo

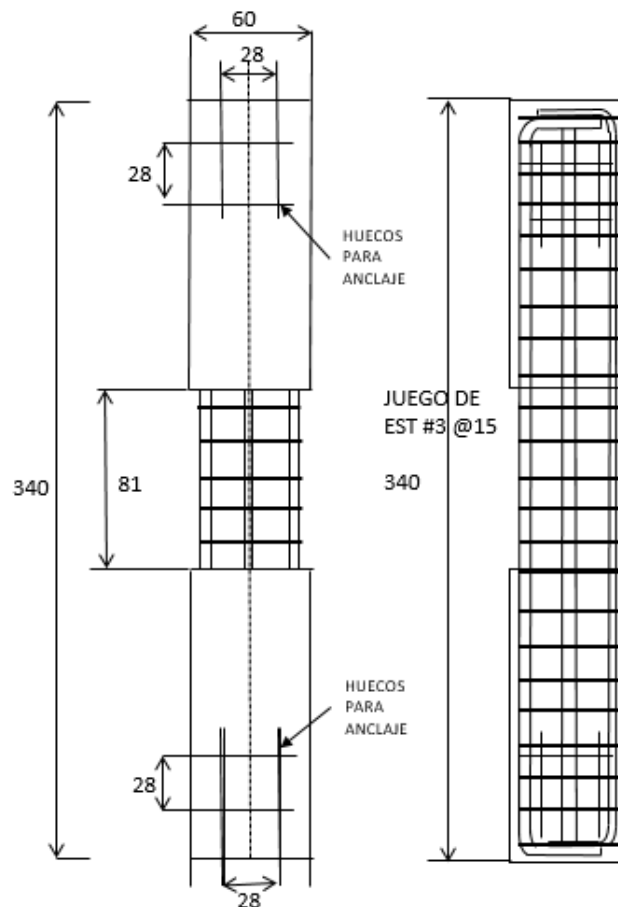
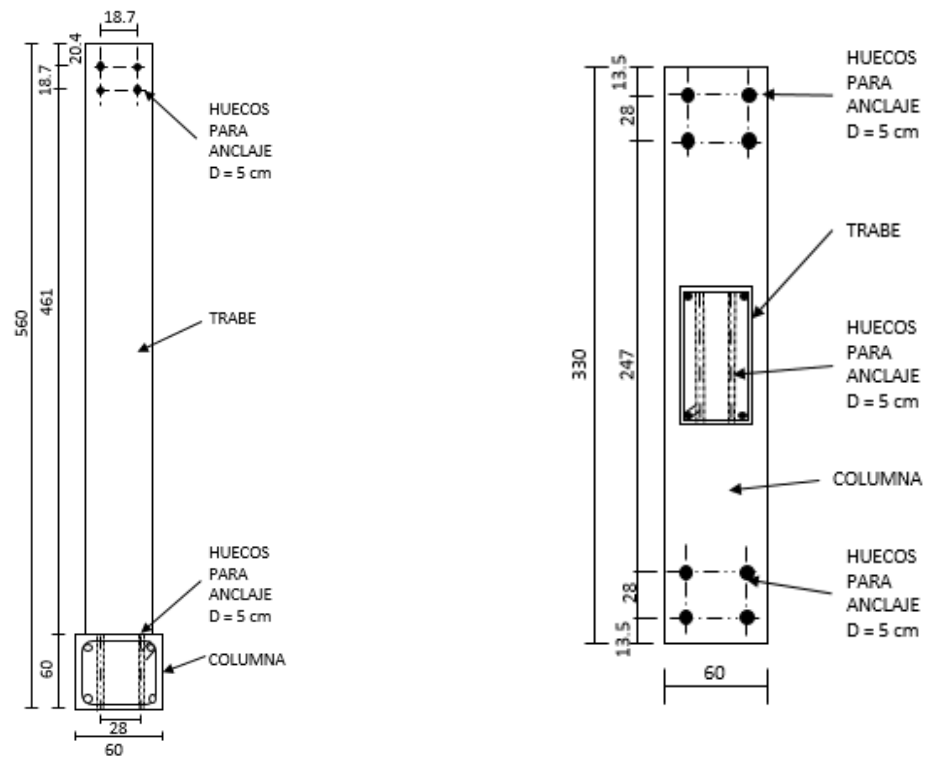


Figura 10. Geometría y distribución de acero de refuerzo en la columna



a) Vista lateral

b) Vista en planta

Figura 11. Geometría en planta y elevación del espécimen

Los materiales que conformaron el espécimen fueron concreto con resistencia de $f'c = 550 \text{ kg/cm}^2$ y acero con fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.

El espécimen rehabilitado cambió su geometría ligeramente en la base de la trabe, donde se encuentra la conexión con la columna (Figura 12). Esto debido a que se tuvo que incrementar la sección para poder rehabilitar el espécimen dañado. La sección de la columna permaneció igual.

A partir de la conexión de la columna con la viga, el tamaño final de la sección rehabilitada fue de $95 \text{ cm} \times 54 \text{ cm}$. Esas dimensiones fueron medidas después de la rehabilitación con CRFA. El cambio de dimensiones ocurrió en una longitud de 122 cm a partir de la columna.

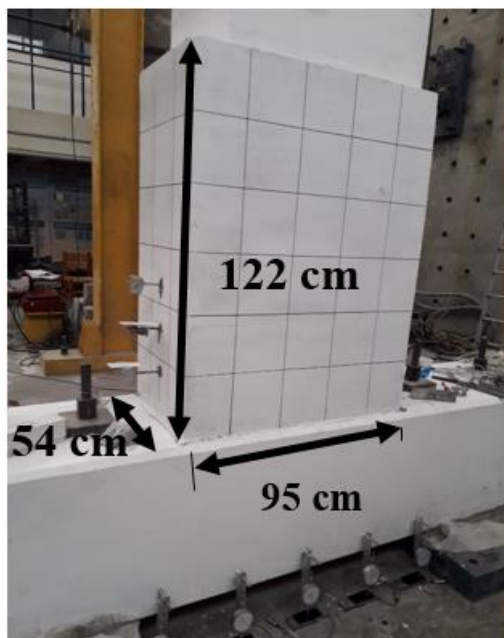


Figura 12. Dimensiones finales de la zona rehabilitada.

Los materiales utilizados en la rehabilitación fueron los siguientes:

- Densocret-RF (concreto de ultra desempeño reforzado con fibras de acero).
Se aplicó mediante el colado con cimbra en capas delgadas alrededor de la columna.
En la Tabla 2 se describen los datos técnicos, propiedades físicas, resistencias, durabilidad y otros datos relevantes del mortero reforzado con fibras.

Tabla 2. Datos y propiedades físicas del mortero.

Datos Técnicos	
Tipo:	Mortero minicomponente a base de cemento.
Densidad:	Aprox. 2.32 kg/L de la mezcla fresca.
Proporciones de mezcla:	De 3.5 a 4 lts de agua por saco de 25 kg
Propiedades físicas	
Fraguado inicial:	45 min aprox.
Fraguado final:	90 min aprox.
Resistencia a 28 días en kg/cm ²	
Resistencia a la compresión (ASTM C-109)	1100
Resistencia a la flexión (ASTM C-348)	270
Resistencia a la tensión directa (NMX-B-172)	80
Módulo de elasticidad (E)	35-40 GPa
Durabilidad	
Resistencia a sulfatos (ASTM C-1012)	Alta

- INJ-750 (mortero fluido de alta resistencia para inyección)

Es un mortero fluido a base de cementos especiales y agregados seleccionados, especialmente para inyección de grietas y cavidades en muros, losas y otras más estructuras de concreto.

La ventaja que tiene este mortero es su fluidez, para su colocación por inyección o vertido. Otra ventaja es su resistencia alta, gracias a los agregados especiales que se ocupan para su fabricación. La Tabla 3 muestra los datos más significativos del mortero INJ-750.

Tabla 3. Datos y propiedades del mortero de inyección.

Datos Técnicos	
Tipo:	Mortero base cemento y aditivos
Propiedades físicas	
Tiempo de fraguado (ASTM C-109)	
Fraguado inicial:	60 min aprox.
Fraguado final:	120 min aprox.
Resistencia a 28 días en kg/cm²	
Compresión (ASTM C-109)	1071
Flexión (ASTM C-348)	95.
Módulo de elasticidad (E)	30 Gpa

- Polybond-125 (látex acrílico como puente de adherencia)

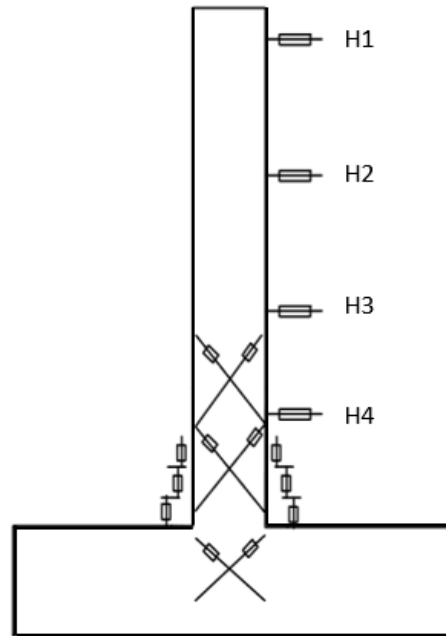
Es una dispersión de polímeros modificados que se utiliza para la fabricación de concretos, aumentando la adherencia del concreto sobre cualquier superficie. La Tabla 4 muestra los datos técnicos del Polybond 125.

Tabla 4. Datos técnicos del Polybond 125.

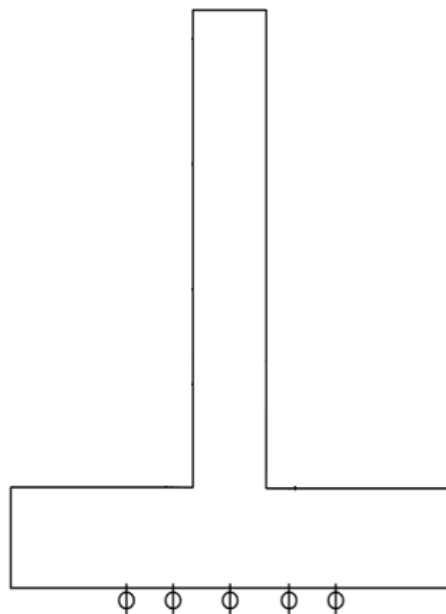
Datos Técnicos	
Tipo:	Dispersión acrílica estirenada
Densidad	Aprox. 1.05 g/ml
Contenido de sólidos	20%

3.2 Instrumentación

Se colocaron un total de 17 transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT, por sus siglas en inglés de *Linear Variable Displacement Transducer*) en la parte lateral de la trabe, cinco de éstos en el canto de la trabe, seis verticales cerca de la conexión de la trabe-columna y seis más de manera diagonal. También se colocaron 10 micrómetros en la parte inferior de la columna. En las Figuras 13 y 14 se muestra la posición de los instrumentos en la trabe nueva y en la reforzada, respectivamente. En ambos casos se usó la misma instrumentación.

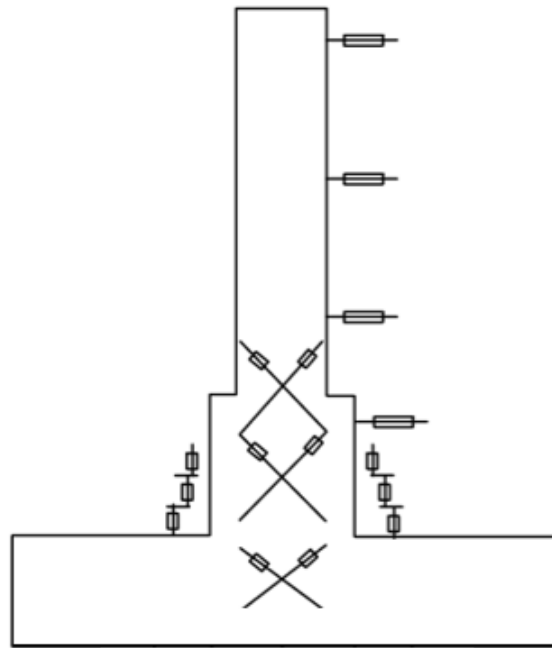


a) Instrumentación con LVDTs

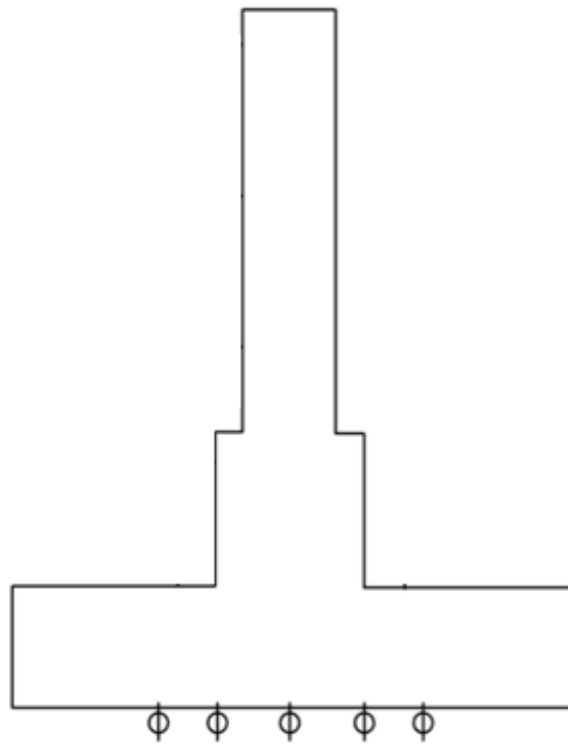


b) instrumentación con micrómetros

Figura 13. Instrumentación de la columna original



a) Instrumentación de la cara posterior



b) instrumentación de los micrómetros

Figura 14. Instrumentación de la columna reforzada

3.3 Protocolo de carga

Para el espécimen original y rehabilitado, se aplicó un protocolo de carga controlado por desplazamientos. Los desplazamientos se controlaron con el LVDT H1 colocado en la parte superior de la trabe. Sin embargo, llegó un momento donde la carrera del instrumento ya no alcanzó. Entonces, se decidió controlar los desplazamientos con los LVDTs H3 y H4, colocados a la mitad y a un cuarto de la longitud de la trabe, respectivamente.

La historia de desplazamientos aplicados se muestra en la Figura 15. Antes de cada incremento de desplazamiento indicado en la figura se hizo un ciclo equivalente a la mitad del ciclo inmediato anterior. Esto se realizó con el fin de medir la degradación de la rigidez en cada ciclo de desplazamientos aplicado.

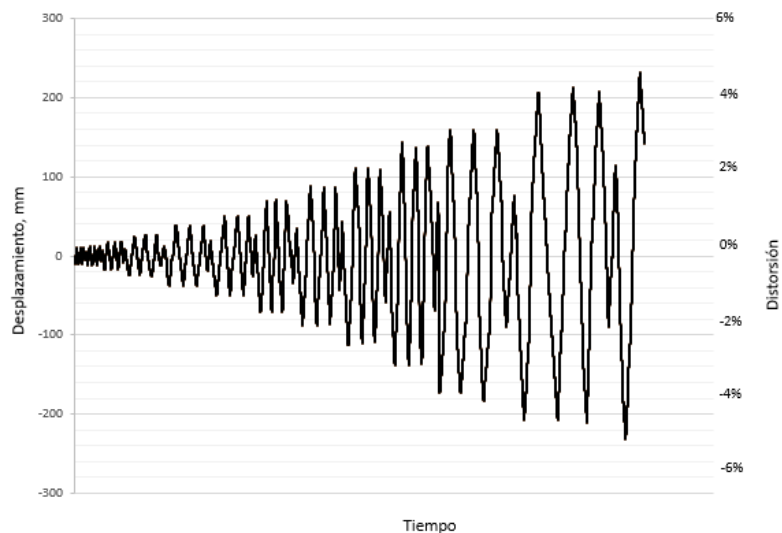


Figura 15. Historia de desplazamiento en LVDT H1

3.4 Proceso de rehabilitación

Para la rehabilitación, primero se limpió completamente el área de trabajo y la zona del daño. Esto se llevó a cabo con ayuda de brochas, escobas y cinceles. Estos últimos se utilizaron para retirar algunos fragmentos de concreto que ya se encontraban sueltos, pero el refuerzo de acero no permitía desprenderlos fácilmente del elemento. La Figura 16 muestra la conexión después de realizar el proceso de limpieza.



Figura 16. Limpieza y desprendimiento de material deteriorado

También fue necesario retirar la pintura. Esto se realizó con un esmeril, como se puede observar en la Figura 17.



a) Esmerilado



b) limpieza con agua

Figura 17. Limpieza del espécimen

Una vez que el elemento ya se hallaba limpio, se colocó un poco de papel y cinta (Figura 18 a), para poder retener el mortero inyectado en grietas y con esto evitar derramamiento. El mortero fue preparado con agua y cemento (Figura 18 b), después se llenó el cartucho de una pistola con éste. Se utilizó la pistola para tener mejor precisión y menos pérdidas al rellenar las grietas (Figura 21 c). Se dejó fraguar el mortero, por quince minutos, aproximadamente. Pasado este tiempo, se colocó un adhesivo (látex) para garantizar la adherencia del mortero con el concreto del espécimen (Figura 21 d).



a)



b)



c)



d)

Figura 18. Inyección de grietas

Antes de producir el mortero, con el cual fue rehabilitado el espécimen, se colocó una cimbra; que es una estructura auxiliar que sirve como molde, para poder dar una geometría deseada. La cimbra tuvo una altura de 1.22 m, una base de 96 cm y otra de 55 cm. Ya colocada la cimbra, se colocó una esponja para evitar que el mortero se fuera a derramar por la base de la cimbra.



Figura 19. Colocación de la Cimbra

La primera mezcla de mortero se realizó con una mezcladora satelital que sirve para fabricar morteros con fibras de acero (Figura 20). La primera mezcla tuvo seis bultos de cemento de veinticinco kilogramos, seis bultos de fibra de acero de tres kilogramos y dos cubetas de agua. Para procesar esta mezcla, primero se colocó el cemento dentro de la mezcladora. Después se vaciaron las dos cubetas de agua, y se comenzó a mezclar. Cuando se tuvo el mortero bien mezclado, se vaciaron los seis bultos de fibras de acero y se dejó mezclar unos cinco minutos más. Cuando ya estuvo lista la mezcla, se dispuso a colar el primer colado. Este fue muy rápido ya que la mezcladora satelital tiene un orificio en la parte inferior que permite que sea más rápido el vaciado de la mezcla en cubetas para llevar la mezcla al cajón de la cimbra (Figura 21). Esta primera tanda alcanzó una altura de treinta y seis centímetros. El proceso de colado hasta ahí fue muy rápido. Sin embargo, se tuvo una falla en la mezcladora satelital, por lo que las siguientes mezclas se hicieron con una mezcladora tipo “trompo”, útil para concreto normal.

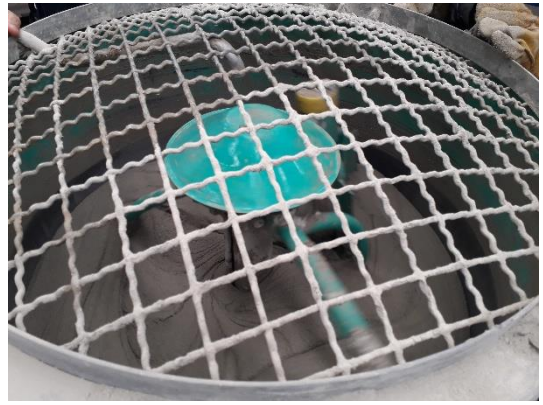


Figura 20. Mezcla de concreto con mezcladora satelital.



Figura 21. Vaciado del concreto Densocret-RF

La mezcla con la mezcladora tipo “trompo” (Figura 22), se llevó a cabo cuarenta minutos después de haber hecho el primer colado. Como una primera prueba para observar cómo se mezclaban los agregados del mortero, se utilizaron cuatro bultos de cemento y cuatro de fibras. Así como una porción equivalente de agua. El proceso de mezclado en el trompo fue similar a aquel en la mezcladora satelital. Primero se colocaron dentro del trompo los cuatro bultos de cemento y en seguida el agua. Ya teniendo el mortero bien mezclado, se vaciaron los cuatro bultos de fibras. La mezcla en este equipo fue un poco más lenta, en comparación con la mezcladora satelital. Aunque el proceso de mezclado fue más lento, se obtuvo una mezcla adecuada, por ello se realizaron dos mezclas más con este equipo. En el primer colado con la primera mezcla se alcanzó una altura total de 65 cm en la cimbra. La segunda mezcla con el trompo se realizó con seis sacos de cemento y seis de fibras y se alcanzó una altura de 106 cm. Finalmente, se hizo la cuarta y última mezcla, la cual fue igual que la segunda, para cubrir totalmente la zona de rehabilitación de 122 cm



Figura 22. Mezcla de concreto con mezcladora tipo “Trompo” convencional

Con el colado ya terminado, se utilizó plástico para emplear la cimbra. Esto se hizo para que el mortero no perdiera humedad (Figura 23).



Figura 23. Fin del colado y emplayado de la zona rehabilitada

Después de un día de haber realizado el colado, se descimbro la pieza, al quitar la cimbra, la superficie rehabilitada inmediatamente se mojó con agua y se volvió a emplayar para un mejor curado (Figura 24).



a) Descimbrado

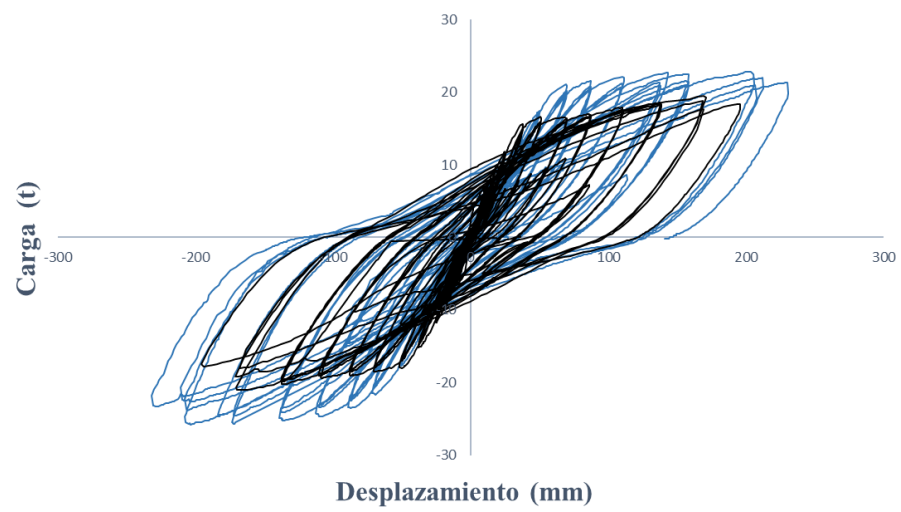


b) Curado del espécimen

Figura 24. Descimbrado y curado del espécimen.

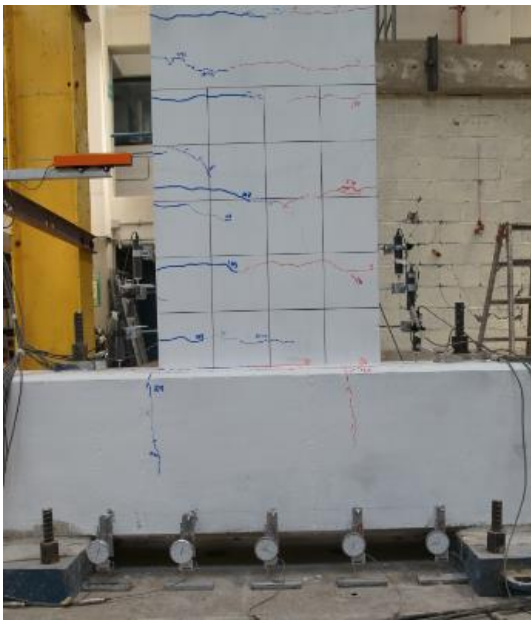
CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

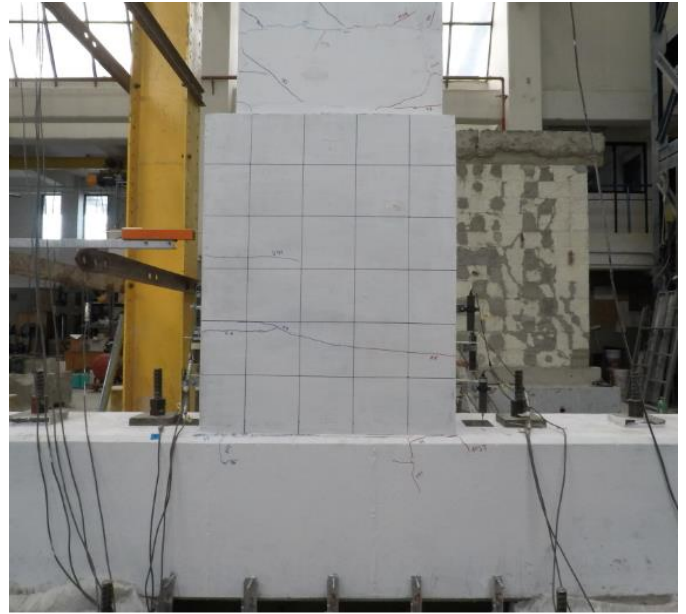


4.1 Agrietamiento

En las figuras 25 a 29 se muestra patrón de agrietamiento del espécimen original y rehabilitado para distintos niveles de distorsión de entrepiso equivalente (θ). Se llevó a cabo un registro de grietas. Cuando la carga era aplicada en sentido positivo las grietas se marcaban con color rojo y cuando los ciclos eran aplicados en sentido negativo, las grietas se marcaban de color azul.

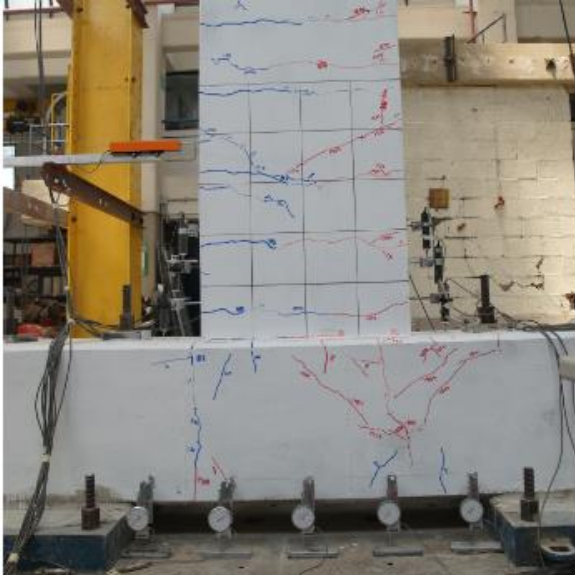


a) Conexión original

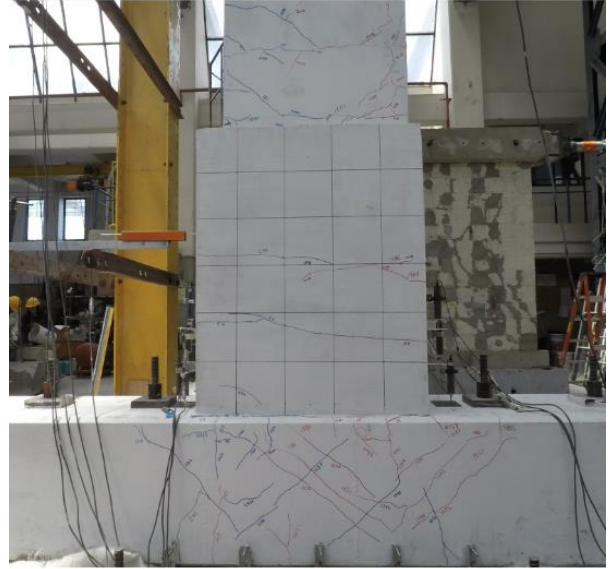


b) Conexión rehabilitada

Figura 25. Agrietamiento en especímenes para $\theta= 0.005$

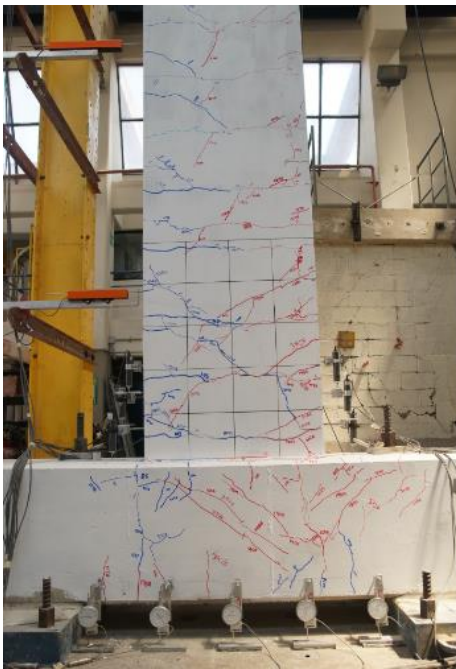


a) Conexión original

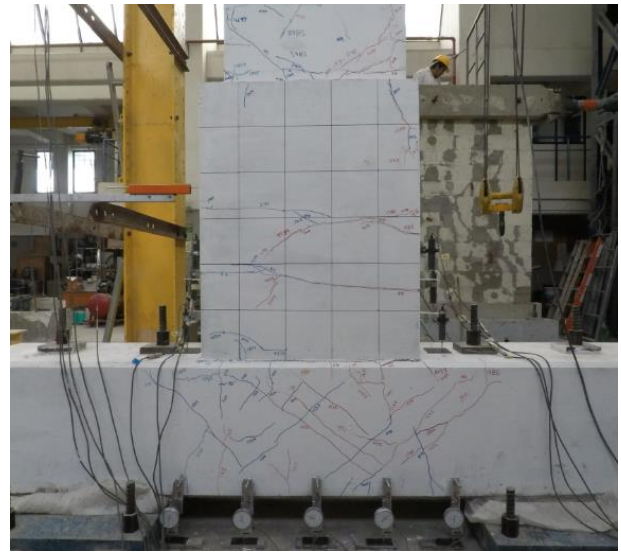


b) Conexión rehabilitada

Figura 26. Agrietamiento en especímenes para $\theta= 0.01$

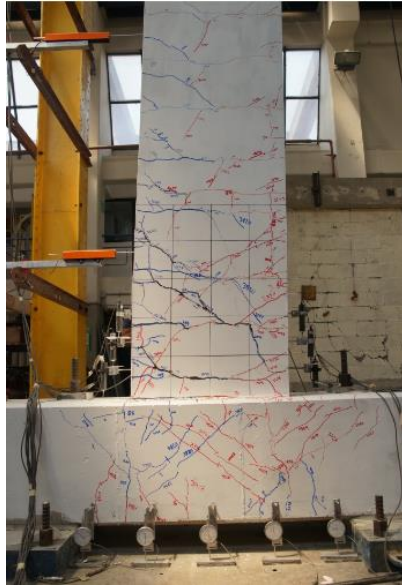


a) Conexión original

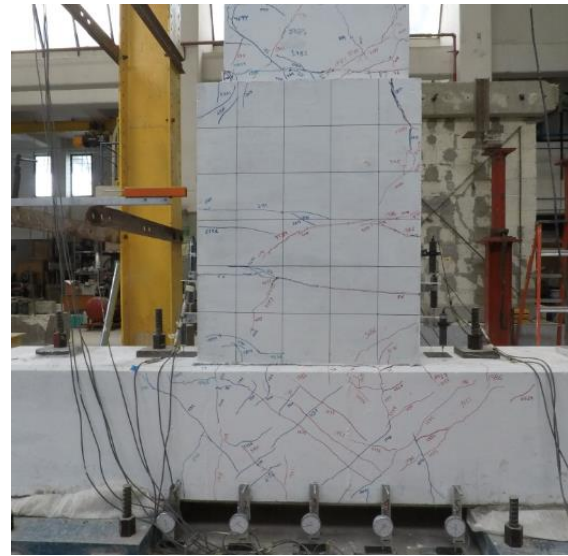


b) Conexión rehabilitada

Figura 27. Agrietamiento en especímenes para $\theta= 0.02$



a) Conexión original

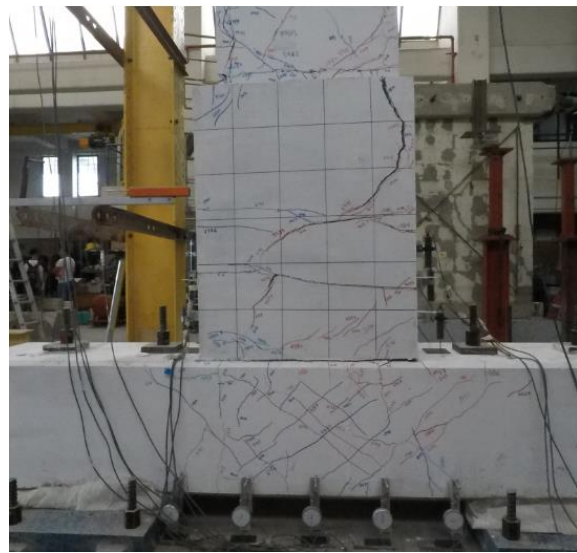


b) Conexión rehabilitada

Figura 28. Agrietamiento en especímenes para $\theta=0.03$



a) Conexión original



b) Conexión rehabilitada

Figura 29. Agrietamiento en especímenes para $\theta=0.04$

Al observar las imágenes y al comparar la conexión original con la rehabilitada, se puede ver que el nivel de agrietamiento y daño es mayor en el espécimen original para distorsiones similares.

Para la distorsión de entrepiso equivalente de 0.5%, aparecen las primeras grietas sobre la trabe en los dos casos. Sin embargo, en el espécimen original se presentan grietas en mayor cantidad. Las grietas que aparecen en el espécimen rehabilitado siguen una junta fría que se formó con el primer colado y el segundo, por el problema que se presentó con la mezcladora satelital, ya descrito en el subcapítulo sobre el proceso de rehabilitación.

Para los niveles de distorsión equivalente de 1%, 2% y 3%, se observa, para el espécimen original, que el agrietamiento va aumentando a lo largo de la trabe y en el nudo de la conexión. Sin embargo, para el espécimen rehabilitado continúan apareciendo las grietas en las juntas que se formaron a través de los diversos colados que se hicieron durante el proceso de rehabilitación.

Para una distorsión equivalente del 4%, se observó que en el espécimen original presentó desprendimiento considerable del concreto. Además, se observó deformación de las barras de acero de refuerzo. Es por esto que se tomó la decisión terminar ahí la prueba, por seguridad del personal y de los instrumentos de medición.

Para la conexión rehabilitada, se observó que a una distorsión equivalente del 4%, se observó un menor nivel de daño y agrietamiento en la superficie rehabilitada, pero el agrietamiento se concentró en el nudo y por encima de la sección rehabilitada.

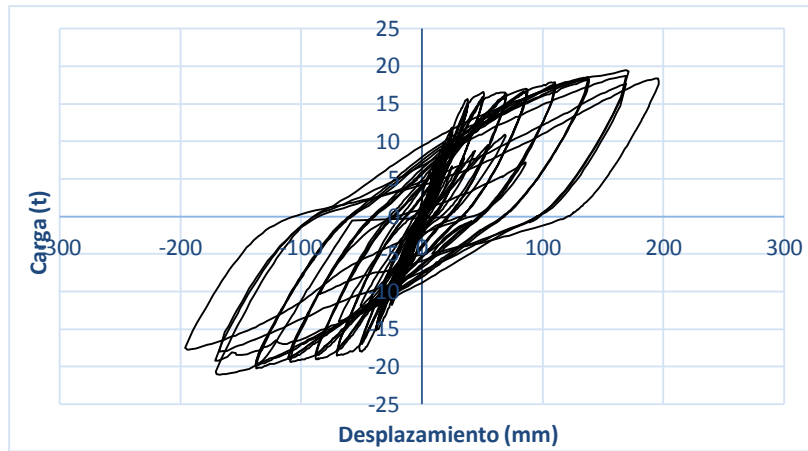
El espécimen rehabilitado se continuó deformando hasta una distorsión del 4.6%, es decir hasta un desplazamiento de 230 mm. Se observó el desprendimiento del concreto y deformación de las barras de acero por encima de la sección rehabilitada (Figura 30). Dado este nivel de daño se decidió parar la prueba para evitar daño al personal y a la instrumentación.



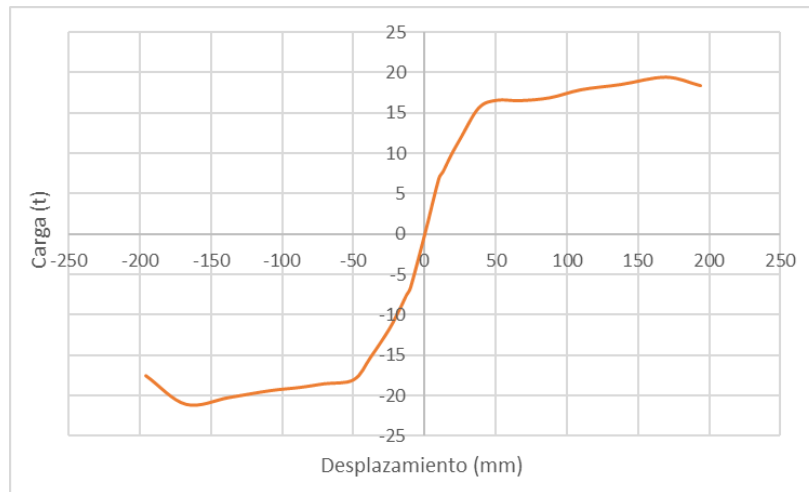
Figura 30. Conexión rehabilitada a una distorsión de 4.6%.

4.2 Curvas carga desplazamiento

Para las dos pruebas de la conexión trabe-columna original y rehabilitada, se obtuvieron las curvas de histéresis carga-desplazamiento. En la Figura 31 se muestra la curva de histéresis y su envolvente para la conexión original. En la primera curva se puede observar que el espécimen original mantiene su capacidad de carga hasta mostrar una disminución significativa en el último ciclo de carga. Esto se puede atribuir al desprendimiento de concreto y al pandeo de las barras de acero longitudinal. También, se puede observar en ambas curvas que la carga máxima que se obtuvo fue de 21 toneladas para un nivel de desplazamiento de 167 mm en el cuadrante negativo; mientras que, en el cuadrante positivo, la carga máxima y su correspondiente desplazamiento fueron: 19.5 t y 170 mm, respectivamente.



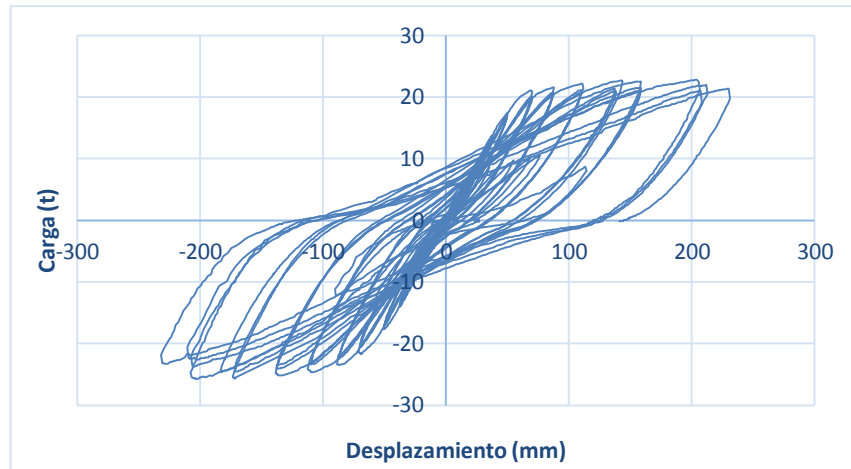
a) Curva de histéresis



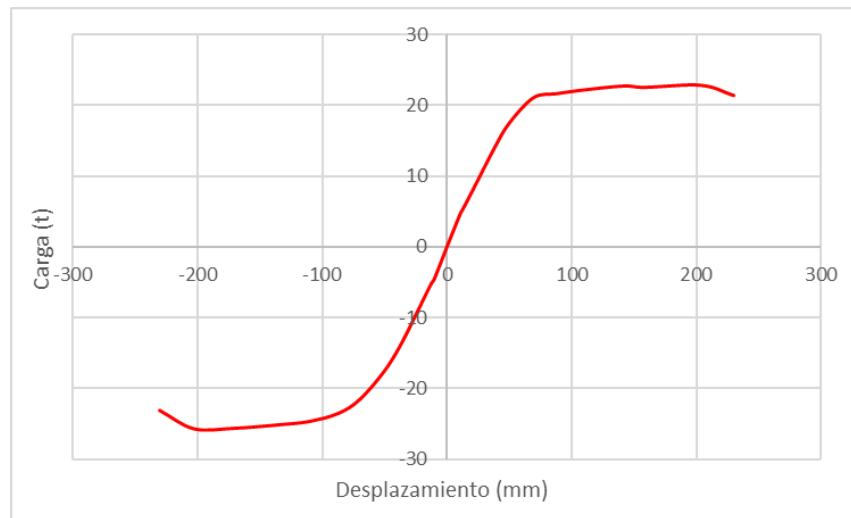
b) Envoltente

Figura 31. Curva de carga-desplazamiento y envoltente del espécimen original

En la Figura 32 se presenta la curva de histéresis y envoltente de la conexión rehabilitada. Se puede observar que el espécimen recupera su capacidad de carga y rigidez. Igual que la conexión original, perdió capacidad de carga significativa en el último ciclo de carga. Aquí, se observa que la carga máxima registrada fue de 25.7 toneladas, para un desplazamiento de 200 mm en el cuadrante negativo; mientras que, en el cuadrante positivo, estos valores fueron 22.5 t y 210 mm, respectivamente.



a) Curva de histéresis



b) Envolvente

Figura 32. Curva de carga-desplazamiento del espécimen rehabilitado

En la Figura 33 se comparan las dos curvas de histéresis anteriores. En esta comparación se aprecia que la conexión rehabilitada no sólo recuperó su capacidad de carga, si no que aumentó con respecto a la conexión original.

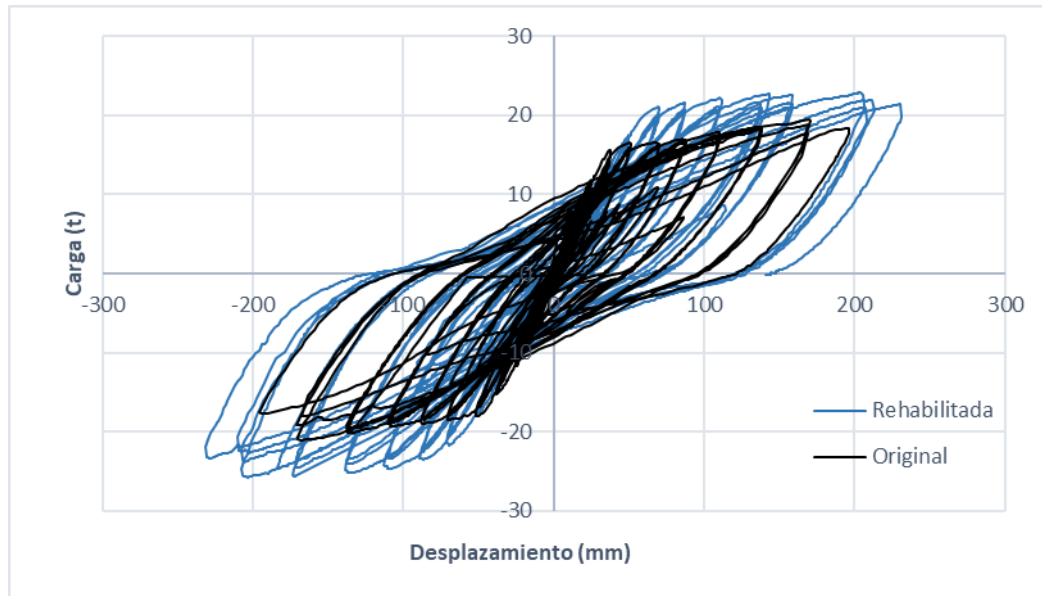


Figura 33. Curva de carga-desplazamiento de los dos especímenes

4.3 Curvas de energía

En la Figura 34 se hace una comparación del comportamiento de ambas conexiones, en términos de la energía de histéresis de ambas pruebas. Se puede observar que la energía en ambas pruebas aumenta conforme a la deformación, con una curva ascendente cóncava positiva. También, se observa que ambas curvas son muy similares, aunque con una pequeña diferencia que podría considerarse no significativa.

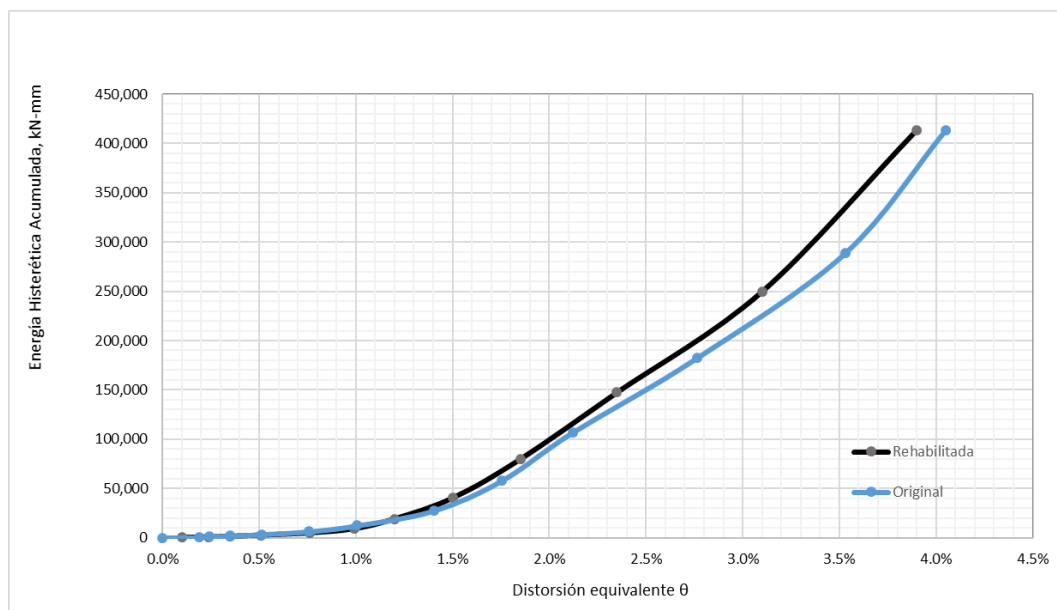


Figura 34. Curvas de energía disipada acumulada

CAPÍTULO V

DISCUSION DE REHABILITACION DE TRABES CON LOSA DE CONCRETO



En este trabajo se explicó el proceso de rehabilitación con concreto reforzado con fibra de acero. La rehabilitación que se hizo fue total, es decir, que se rodeó con una camisa de CRFA la totalidad del elemento. Una ventaja muy importante de la rehabilitación con CRFA es que no es necesario el refuerzo transversal y longitudinal. Esto agiliza el tiempo de ejecución.

Existen otras técnicas de rehabilitación que se han usado en las últimas décadas, dos de ellas se explican en los siguientes subcapítulos. Posteriormente, se ofrece una discusión en el contexto de este estudio.

5.1 Rehabilitación con fibras de carbono

En la actualidad existen diversos avances para poder rehabilitar elementos estructurales, muchas veces se elige un tipo de rehabilitación por la sencillez del proceso. Para la rehabilitación de trabes, la fibra de carbono (Figura 35) es un material muy utilizado, ya que supone ser una buena alternativa.

El proceso de aplicación de este sistema de reforzamiento inicia con la limpieza del área a rehabilitar, dejándola libre de polvo. Si hay que eliminar algún granulado, se debe hacer, esto para que a continuación se aplique una resina sobre la superficie, para nivelar y regularizar la superficie. En seguida se aplica resina sobre la lámina de carbono a aplicar, y se coloca la lámina de fibra de carbono sobre la superficie a rehabilitar. Por último, se aplica otra capa de resina sobre la lámina de fibra de carbono y espolvoreado de arena para incrementar la adherencia. Una vez aplicada la fibra de carbono, su apariencia es tan discreta que pasa desapercibida (Figura 35).



Figura 35. Trabe rehabilitada con fibra de carbono

5.2 Rehabilitación con concreto reforzado

Esta técnica se utiliza para incrementar la capacidad de los elementos estructurales, ya sean, columnas, vigas o muros a través de una camisa de material alrededor del elemento a rehabilitar. Cuando se ha realizado el encamisado se puede conseguir un aumento en la resistencia a fuerza axial, a flexión y flexocompresión, así como un incremento en la rigidez y/o de ductilidad (Alcocer, 2019).

Este tipo de rehabilitación, es una alternativa muy económica. Sin embargo, una desventaja muy importante es el tiempo de ejecución de la rehabilitación, ya que en muchas ocasiones es necesario colocar refuerzo longitudinal y transversal.

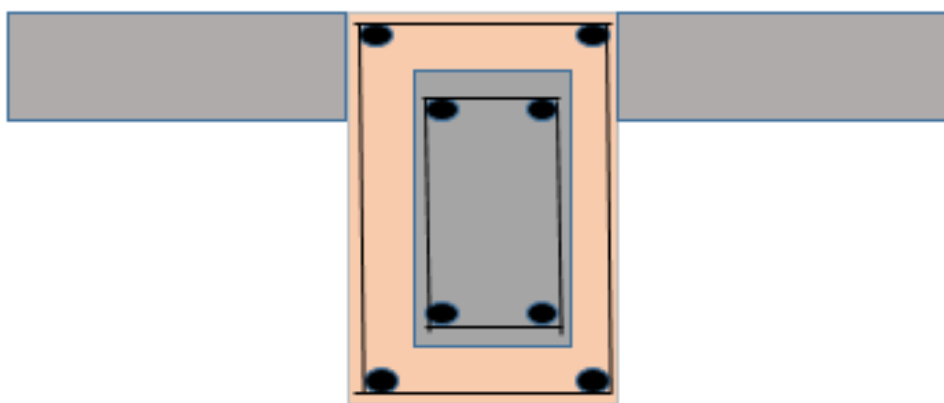


Figura 36. Rehabilitación de trabe con concreto reforzado (adaptada de Alcocer, 2019)

5.3 Discusión

Es significativo notar que, para la rehabilitación con fibra de carbono, no es necesario hacer una demolición de la losa, porque con ese tipo de fibra se puede hacer un encamisado parcial. Por otro lado, las NTC-2017 recomiendan que para realizar una rehabilitación con concreto es necesario rodear todo el elemento, es decir, hacer un encamisado total, por esta razón sería necesario demoler una parte de la losa.

En el estudio presentado en esta tesis, se realizó un encamisado total de la sección dañada en la trabe usando CRFA. Sin embargo, para el caso de traves integradas con losa, el encamisado total sería muy difícil de realizar. Ello implicaría demolición de la losa, lo cual es invasivo y poco práctico. Una posible solución podría ser utilizar encamisado parcial con pernos de anclaje a la losa que permitan emular un encamisado total. O más aún, hacer perforaciones en la losa con cierta separación en la losa para pasar barras de acero que permitan emular un encamisado total. Esto conllevaría a la realización de una investigación experimental más profunda. Aunque eso queda fuera del alcance del presente trabajo, se recomienda explorar esa línea para ver la posibilidad de utilizar la técnica de encamisado total a base de CRFA.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

Se presentaron los resultados de la rehabilitación de una conexión trabe-columna, con concreto reforzado con fibras de acero. Para esto, primero se ensayó la conexión original, donde se llegó a una distorsión equivalente de 4%. A este nivel de distorsión ya había daño muy severo en el elemento, que incluía desconchamiento de concreto y acero de refuerzo expuesto con pandeo de barras. Aquí, se decidió terminar la primera etapa de las pruebas y rehabilitar la sección dañada. En la segunda etapa, el elemento rehabilitado se sometió a las mismas condiciones de carga que el espécimen original. En esta segunda etapa de pruebas se alcanzó una distorsión equivalente de 4.6%.

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas, se ofrecen las siguientes conclusiones:

- Comparando la respuesta del elemento original y rehabilitado con CRFA, se puede concluir que la rehabilitación fue exitosa, pues se logró recuperar, e incluso mejorar las condiciones iniciales, tales como: rigidez, capacidad de carga y capacidad de deformación.
- El elemento original alcanzó una carga máxima de 21 toneladas a una distorsión de 3.3%, mientras que el espécimen rehabilitado registró una carga máxima de 25.7 toneladas a una distorsión de 4%.
- Analizando los resultados obtenidos, se concluye que el sistema de rehabilitación utilizado en este elemento satisface la necesidad de recuperar las condiciones del espécimen original, y que el sistema puede presentar ventajas, comparado con los sistemas convencionales. Sin embargo, es conveniente comentar que este sistema fue aplicado a un solo elemento y que se requiere realizar más pruebas experimentales para validar por completo el desempeño de la técnica de rehabilitación.
- En las curvas de energía se observó una relación entre la energía y la capacidad de deformación del elemento. También, se apreció que la disipación de energía fue similar entre los dos especímenes con diferencias que se podrían considerar despreciables.

6.2 Recomendaciones

En el desarrollo de este trabajo, se observó que el proceso de rehabilitación usado ofrece una gran oportunidad de optimización de tiempo de ejecución, por ello se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda estudiar efectos de algunas propiedades de la fibra en la capacidad de carga y de deformación lateral, tales como: la relación de aspecto, el anclaje de la fibra, la dosificación de fibra utilizada. Esto para poder entender el comportamiento a mayor profundidad.
- Se sugiere estudiar el efecto de la adherencia entre el elemento y el material utilizado para la rehabilitación.
- Finalmente, se sugiere estudiar efectos de encamisado parcial cuando las trabes están integradas en una losa.

REFERENCIAS

ACI Committee 544 (544.4R-88), “Design Considerations for steel fiber reinforced concrete”, American Concrete Institute, EUA.

Aguilar, J., Breña, S.; Del Valle, E.; Iglesias, J.; Picado, M.; Jara, M.; Jirsa, J., (1996), “Rehabilitation of existing reinforced concrete buildings in México City”, Ferguson Structural Engineering Laboratory, The University of Texas at Austin, August 1996

Alcocer, Sergio M. Cruz Víctor D. (2019), “Encamisado de vigas y columnas de concreto” Instituto de Ingeniería UNAM, Ciudad de México.

CFE (2008), “Manual de diseño de obras civiles: diseño por sismo”, Comisión Federal de Electricidad, México.

Cruz Atienza Víctor M., y Singh S. Krishna, y Ordaz S. Mario, (2017), “¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?”, Geofísica e Instituto de Ingeniería UNAM, Recuperado de http://www.iingen.unam.mx/esmx/Investigacion/Proyectos/ReportesTecnicos/Nota_Divulgacion_Sismo_19092017.pdf, fecha de consulta 2019.

Dávila, María P. (2010), “Efecto de la adición de fibras sintéticas sobre propiedades plásticas y mecánicas del concreto” UNAM, Ciudad de México.

Geofísica UNAM, (1999) “Cien años de sismicidad en México” Recuperado de <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html> fecha de consulta, 10 de agosto de 2019.

González, O.M., Cuevas, (2005), “Aspectos fundamentales del concreto reforzado”, Editorial Limusa, Cuarta edición, México.

Hernández, Elvin W. (2011). “Análisis comparativo de la resistencia a la compresión, tensión indirecta y a la flexión del concreto fibroreforzado de matriz cementicia y plumas de ave: pollos” Universidad de San Carlos, Guatemala.

Hop, José y Tatnall Peter C. “Mitos y realidades sobre el concreto reforzado con fibras metálicas” Recuperado de <http://www.imcyc.com/cyt/agosto03/metalias.htm>, fecha de consulta, 4 de septiembre de 2019.

López, Jorge. (2015) “Análisis de las propiedades del concreto reforzado con fibras cortas de acero y macrofibras de polipropileno: influencia del tipo y consumo de fibra adicionado”, Tesis de Maestría, Programa de posgrado, UNAM. Ciudad de México.

Meza, Nayeli, O., (2015), “Los 8 sismos más catastróficos en la historia de México”, Forbes México, Recuperado de <https://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/>, fecha de consulta 21 de agosto de 2019.

NTCC, (2017), “Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, México.

Orbe, A. Roji, E. Cuadrado J. Losada R. (2015) “Estudio para la optimización de la composición de un HACRFA” (hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero). Informes de la construcción, 67 (537) <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.080>.

Soto, Emma. (2008) “Rehabilitación de estructuras de concreto”. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.