



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**REFUERZO Y REHABILITACIÓN DE ESPECÍMENES
DE CONCRETO CON POLÍMEROS REFORZADOS
CON FIBRA**

TESIS

Que para optar por el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Mauricio Edén Hernández Pérez

DIRECTORES DE TESIS

Dr. José Alberto Escobar Sánchez*

*Instituto de Ingeniería, UNAM



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	M.I. VÍCTOR FRANCO
Vocal:	DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ
Secretario:	M.I. HÉCTOR JAVIER GUZMÁN OLGUÍN
1er. Suplente:	ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ
2do. Suplente:	DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTORES DE TESIS:

Dr. José Alberto Escobar Sánchez*

*Instituto de Ingeniería, UNAM

ÍNDICE

RESUMEN

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. Sistemas de reforzamiento y rehabilitación estructural.....	1
1.1.1. Encamisados de concreto reforzado.....	1
1.1.2. Encamisados metálicos.....	1
1.1.3. Polímeros reforzados con fibra (FRP por sus siglas en inglés).....	2
1.2. Ventajas y desventajas de sistemas de reforzamiento y rehabilitación estructural.....	2

CAPÍTULO 2 SISTEMAS DE REFORZAMIENTO Y REHABILITACIÓN CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (PRF)

2.1. Características de sistemas PRF.....	5
2.1.1 Fibra de carbono.....	5
2.1.2. Fibra de vidrio.....	5
2.1.3. Fibra de aramida.....	5
2.2. Ventajas y desventajas de sistemas PRF.....	6
2.3. Resinas epóxicas.....	6
2.4. Colocación y diseño de PRF.....	7
2.5. Diseño de PRF.....	7
2.5.1. Normativa para el diseño de reforzamiento con PRF de elementos estructurales.....	7
2.5.2. Criterios de diseño para el reforzamiento de elementos estructurales con fibra de carbono.....	7

CAPÍTULO 3 PRUEBAS DE LABORATORIO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO REFORZADOS CON PRFC

3.1. Especímenes ensayados a compresión.....	9
3.2. Pruebas a compresión axial de especímenes de concreto.....	13

CAPÍTULO 4 OBTENCIÓN Y MANEJO DE RESULTADOS

4.1. Resultados obtenidos de las pruebas de compresión.....	19
4.2. Ajuste de los datos obtenidos de las pruebas de compresión.....	19

4.2.1. Obtención del módulo de elasticidad	19
4.2.2. Ajuste de curvas de capacidad	21
4.3. Resultados.....	25

CAPÍTULO 5
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS DE ELEMENTOS
DE CONCRETO REFORZADOS CON PRF

5.1. Resistencia teórica de los especímenes utilizados	41
5.2. Análisis numérico y teórico de los resultados	45

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
--	-----------

REFERENCIAS

RESUMEN

Se analiza el uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (por sus siglas PRFC) como método de reforzamiento y rehabilitación para especímenes de concreto sometidos a carga axial. Se compara el comportamiento experimental y teórico. Como resultado, se presenta la resistencia y módulo de elasticidad de los especímenes ensayados para los cuales, al utilizar la fibra de carbono como refuerzo, la resistencia a carga axial incrementó en comparación con elementos sin refuerzo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los métodos de reforzamiento y rehabilitación estructural son sistemas que se utilizan cuando se requiere rehabilitar o mejorar el comportamiento estructural de elementos y en general de todo un sistema estructural (Bazán E., 1999). Éstos están formados por la unión de dos o más elementos y son añadidos a elementos estructurales. Con ello se busca extender la vida útil de elementos estructurales y edificaciones.

1.1. Sistemas de reforzamiento y rehabilitación estructural

Existen diferentes tipos de sistemas de reforzamiento estructural para reparar o rehabilitar elementos de concreto. Éstos ayudan a estabilizar y otorgar una resistencia igual o superior a la original (sin reforzamiento), entre otras características.

A continuación, se mencionan algunos tipos de sistemas de reforzamiento para elementos de concreto:

1.1.1. Encamisados de concreto reforzado

Este sistema consiste en encamisar elementos estructurales con acero de refuerzo y concreto. Su principal objetivo es incrementar la capacidad sísmica, resistencia, ductilidad y rigidez (Figura 1.1).



Figura 1.1. Columna con acero de refuerzo para encamisado de concreto

1.1.2. Encamisados metálicos

La principal característica de este encamisado es la unión de diferentes elementos metálicos, primordialmente placas (soleras) y perfiles estructurales (perfiles tipo I, H, ángulos, etc.) entre sí mediante soldadura, estas rodean al elemento de concreto e incrementan su resistencia (Figura 1.2).



Figura 1.2. Columna reparada con encamisado metálico

1.1.3. Polímeros reforzados con fibra (FRP por sus siglas en inglés).

Su función principal es aumentar la resistencia del elemento de concreto tomando las cargas que este recibe a través de la dirección en la que fue colocada la fibra. Adicionalmente, puede aumentar el confinamiento del concreto (Figura 1.3).



Figura 1.3. Conexión de concreto armado reparada con fibra de carbono

1.2. Ventajas y desventajas de sistemas de reforzamiento y rehabilitación estructural

La selección adecuada de un sistema de reforzamiento depende del tipo de estructuración que se pretende reparar y/o reforzar, ya que cada sistema cuenta con características particulares y aporta propiedades mecánicas diferentes. Por esta razón, es necesario llevar a cabo una evaluación de las características del sistema y elegir el reforzamiento conveniente.

En la Tabla 1.1, se describen las ventajas y desventajas principales entre diferentes tipos de reforzamiento

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas entre diferentes tipos de reforzamiento

Refuerzo	Ventajas	Desventajas
Encamisado de concreto reforzado	Confinamiento de elementos dañados	Ocasionalmente, es imposible cubrir todas las caras del elemento
	Aumento en rigidez y resistencia	Uso de cimbra
		Elementos robustos
Encamisado metálico	No presenta robustez	Recimentación Personal especializado para su colocación
	Rapidez de montaje	Presenta corrosión
	Menor peso en comparación a otros sistemas	Deficiencia ante incendios
Polímeros reforzados con fibra (FRP)	Confinamiento de elementos dañados	Recimentación Costo elevado
	Material liviano	Personal especializado para colocación
	Elementos no robustos	Requiere personal especializado para su colocación

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE REFORZAMIENTO Y REHABILITACIÓN CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA (PRF)

2.1. Características de sistemas PRF

Los sistemas de Polímeros Reforzados con Fibra (PRF) son utilizados para incrementar la resistencia a fuerzas cortantes, flexionantes y de compresión, así como mejorar el confinamiento en algunos puntos específicos del elemento habilitado con este sistema.

Se pueden utilizar diferentes tipos de fibra, sin embargo, las más comunes son: carbono (C), vidrio (G) y aramida (A). A continuación, se explican algunas de sus características (Cuadros H., 2007).

2.1.1 Fibra de carbono

Esta fibra se encuentra compuesta por hilos de carbono de un diámetro entre cinco y diez micrómetros (Figura 2.1), que están formados en su mayoría de carbono. Estructuralmente, es utilizada para incrementar la resistencia, ductilidad, y módulo de elasticidad de un elemento. Puede soportar temperaturas de hasta 1500°C sin perder sus propiedades.

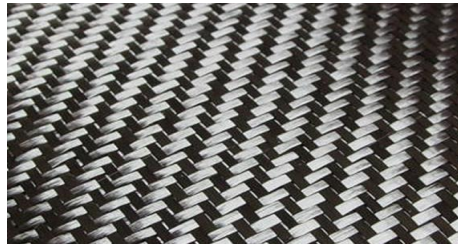


Figura 2.1. Fibra de carbono

2.1.2. Fibra de vidrio

Es una fibra que, en comparación a la fibra de carbono, tiene menor resistencia, rigidez y un costo menor, es un aislante térmico y soporta mayor elongación (Figura 2.2).

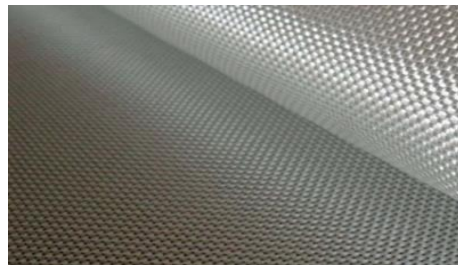


Figura 2.2. Fibra de vidrio

2.1.3. Fibra de aramida

Cuenta con propiedades de compresión débiles debido a su forma microestructural anisotrópica, sus propiedades mecánicas difieren dependiendo la dirección en la que se apliquen fuerzas, sin embargo, soporta impactos de gran magnitud. Esta fibra debe recubrirse, ya que la exposición al ambiente (en especial los rayos ultravioleta) repercute negativamente en sus propiedades mecánicas (Figura 2.3).

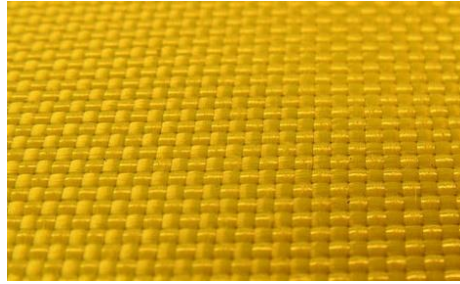


Figura 2.3. Fibra de aramida

2.2. Ventajas y desventajas de sistemas PRF

Cada fibra presenta características únicas, por ello, debe analizarse en qué caso será utilizada. En la Tabla 2.1, se describen algunas ventajas y desventajas de estas.

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas entre diferentes fibras

Tipo de fibra	Ventajas	Desventajas
Carbono	Alta resistencia a la tensión	Precio elevado
	Mayor resistencia que el acero	Aplicación en una sola dirección
	Material anisotrópico	Conductividad eléctrica
Vidrio	Propiedades isotrópicas	Bajo módulo de elasticidad
	Mantenimiento casi nulo	Poca adherencia con resinas
	Aislante térmico	Reacción química en contacto con concreto
Aramida	Presenta alto módulo de elasticidad ante tensión	Absorción de humedad
	Gran resistencia a impactos	Poca resistencia al fuego (entre 420°C y 480°C)
	Presenta comportamiento no lineal cuando trabaja a compresión	Costo elevado

2.3. Resinas epóxicas

Existen dos tipos de resinas, las epóxicas y las hechas con polímeros. Las primeras son utilizadas como el pegamento entre las fibras y los elementos que serán reforzados, ayudando a transferir las cargas, mientras que las segundas son requeridas para la reparación de grietas y la unión de elementos estructurales nuevos.

Las resinas presentan mayor resistencia ante tensión, flexión y compresión en comparación con el concreto. No obstante, las temperaturas mayores a 100°C, deterioran sus propiedades mecánicas y las menores a 10°C no permiten su endurecimiento (Sika AG, 2015).

Estos adhesivos están compuestos por dos elementos; un catalizador que ayuda a endurecer la mezcla y una resina que puede ser; epóxica, acrílica, de poliuretano, de poliéster, entre otras más. La elección de la que se utilice depende de las características visuales y mecánicas que se requieran.

2.4. Colocación y diseño de PRF

La colocación de las fibras no varía con los distintos fabricantes de éstas. Se debe contar una superficie seca, limpia y libre de cualquier impureza que impida que las caras del elemento estructural sean lisas. En caso de ser necesario, se puede reparar elementos estructurales que presenten daño antes de la colocación de la resina y la fibra, para ello, debe emplearse un mortero de reparación estructural que debe soportar las cargas a las que será sometido. Como último paso antes de colocar las láminas de polímeros reforzados con fibra, se prepara el pegamento mezclando el catalizador con la resina, tomando en cuenta las recomendaciones y cuidados que proporcione el fabricante.

Para la colocación del adhesivo en el elemento estructural, es requerida una espátula con la que se formará una capa de aproximadamente un milímetro de espesor. Para los polímeros reforzados con fibra se utiliza la misma herramienta y de igual forma la misma cantidad de resina. Se une la fibra con el elemento estructural ejerciendo presión uniforme mediante un rodillo macizo, se presiona la fibra hasta expulsar toda la resina sobrante. Se remueve el adhesivo excedente y en caso de colocar más capas, es necesario limpiar la fibra ya colocada, así como la nueva capa a colocar, volviendo a aplicar resina y una vez adherida retirar el exceso de la misma (Castillo R., 2010).

2.5. Diseño de PRF

2.5.1. Normativa para el diseño de reforzamiento con PRF de elementos estructurales

El Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés) es una organización estadounidense creada en 1904 que se encarga de plantear y estudiar normas, así como recomendaciones que ayudan a diseñar elementos de concreto reforzado y métodos para el reforzamiento de los mismos.

La norma ACI 440.2R-08 es utilizada para calcular el aporte de resistencia a elementos estructurales que lo requieran mediante PRF y resinas. De este modo se consigue una uniformidad entre el sistema estructural y el sistema de reforzamiento tomando en cuenta las propiedades de ambos (ACI, 2008).

2.5.2. Criterios de diseño para el reforzamiento de elementos estructurales con fibra de carbono

De acuerdo con la norma mencionada, los factores considerados para el diseño de elementos estructurales con PRF son características del concreto y de la fibra de carbono. Entre ellos se encuentran:

- Dimensiones de los elementos estructurales
- Resistencia del concreto
- Factores de reducción
- Número de capas de fibra de carbono
- Espesor de la lámina de fibra de carbono, así como su resistencia a tensión, módulo de elasticidad y su deformación última.

CAPÍTULO 3

PRUEBAS DE LABORATORIO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO REFORZADOS CON PRFC

3.1. Especímenes ensayados a compresión

Con la finalidad de estudiar la influencia de la fibra de carbono como sistema de reforzamiento y rehabilitación para cilindros de concreto, se realizaron pruebas de compresión axial en la máquina universal del laboratorio de Mecánica de Materiales de la Facultad de Ingeniería, UNAM, a 66 cilindros de concreto con dimensiones de 30 cm de altura por 15 cm de diámetro (relación 2 a 1).

Para ello, se simularon diferentes condiciones de reforzamiento y rehabilitación. En las Figuras 3.1 a 3.10 se muestran algunos de los especímenes estudiados.



a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.1. Cilindro de concreto sin refuerzo, especímenes de control (CON)



a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.2. Cilindro de concreto reforzado con una capa de fibra de carbono (RFC-1)



a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.3. Cilindro de concreto reforzado con dos capas de fibra de carbono (RFC-2)



a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.4. Cilindro de concreto reforzado con tres capas de fibra de carbono (RFC-3)

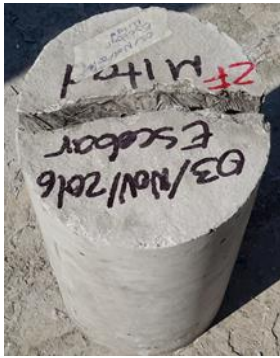


a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.5. Cilindro de concreto con refuerzo parcial de fibra de carbono (RFC-P)



a) Grieta simulada (cilindro dividido en dos partes)



b) Antes de la prueba



c) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.6. Cilindro de concreto con grieta simulada y reparado con una capa de fibra de carbono (D-RFC-01)



a) Grieta simulada (cilindro dividido en dos partes)



b) Antes de la prueba



c) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.7. Cilindro de concreto con grieta simulada y reforzado con dos capas de fibra de carbono (D-RFC-02)



a) Grieta simulada (cilindro dividido en dos partes)



b) Antes de la prueba



c) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.8. Cilindro de concreto con grieta simulada, rehabilitado con resina epóxica y reforzado con una capa de fibra de carbono (D-RFC+E-01)



a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.9. Cilindro de concreto con grieta simulada y reparada con resina epóxica (D-RCE)



a) Antes de la prueba



b) Falla a compresión del cilindro

Figura 3.10. Cilindro de concreto con grieta simulada, rehabilitado con resina epóxica y refuerzo parcial de fibra de carbono (D-RFC+E-P)

A los 66 cilindros ensayados se les asignó un número, clave, estado (para saber si presenta daño o no) y una breve descripción (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Organización y descripción de los especímenes utilizados en las pruebas de carga axial

Grupo	Subgrupo	Especímen	Clave	Estado	Descripción
1	1A	1	CON-01	Sin daño	Especímenes de control
		2	CON-02		
		3	CON-03		
		4	CON-04		
		5	CON-05		
		6	CON-06		
		7	CON-07		
	1B	8	RFC-1-01	Sin daño	Cilindro de concreto sin refuerzo
		9	RFC-1-02		
		10	RFC-1-03		
		11	RFC-1-04		
		12	RFC-1-05		
		13	RFC-1-06		
		14	RFC-1-07		

Grupo	Subgrupo	Espécimen	Clave	Estado	Descripción
2	2A	15	RFC-2-01	Sin daño	Cilindro de concreto con refuerzo de dos capas de fibras de carbono
		16	RFC-2-02		
		17	RFC-2-03		
		18	RFC-2-04		
		19	RFC-2-05		
		20	RFC-2-06		
		21	RFC-2-07		
	2B	22	RFC-3-01	Sin daño	Cilindro de concreto con refuerzo de tres capas de fibra de carbono
		23	RFC-3-02		
		24	RFC-3-03		
		25	RFC-3-04		
		26	RFC-3-05		
		27	RFC-3-06		
		28	RFC-3-07		
3	3A	29	RFC-P-01	Sin daño	Cilindro de concreto con refuerzo parcial de fibra de carbono
		30	RFC-P-02		
		31	RFC-P-03		
		32	RFC-P-04		
		33	RFC-P-05		
		34	RFC-P-06		
		35	RFC-P-07		
	3B	36	D-RFC-01-01	Con daño	Cilindro de concreto con grieta simulada y reparada con una capa de fibra de carbono
		37	D-RFC-01-02		
		38	D-RFC-01-03		
		39	D-RFC-01-04		
		40	D-RFC-01-05		
		41	D-RFC-01-06		
		42	D-RFC-01-07		
4	4A	43	D-RFC-02-01	Con daño	Cilindro de concreto con grieta simulada y reparada con dos capas de fibra de carbono
		44	D-RFC-02-02		
		45	D-RFC-02-03		
		46	D-RFC-02-04		
		47	D-RFC-02-05		
		48	D-RFC-02-06		
		49	D-RFC-02-07		
	4B	50	D-RFC+E-01-01	Con daño	Cilindro de concreto con grieta simulada, reparada con resina epóxica y con una capa de fibra de carbono
		51	D-RFC+E-01-02		
		52	D-RFC+E-01-03		
		53	D-RFC+E-01-04		
		54	D-RFC+E-01-05		
		55	D-RFC+E-01-06		
		56	D-RFC+E-01-07		
5	5A	57	D-RCE-01	Sin daño	Cilindro de concreto con grieta simulada y reparada con resina epóxica
		58	D-RCE-02		
		59	D-RCE-03		
		60	D-RCE-04		
		61	D-RCE-05		
		62	D-RCE-06		
		63	D-RCE-07		
	5B	64	D-RFC+E-P-01	Sin daño	Cilindro de concreto con grieta simulada, reparada con resina epóxica y refuerzo parcial de fibra de carbono
		65	D-RFC+E-P-02		
		66	D-RFC+E-P-03		

3.2. Pruebas a compresión axial de especímenes de concreto

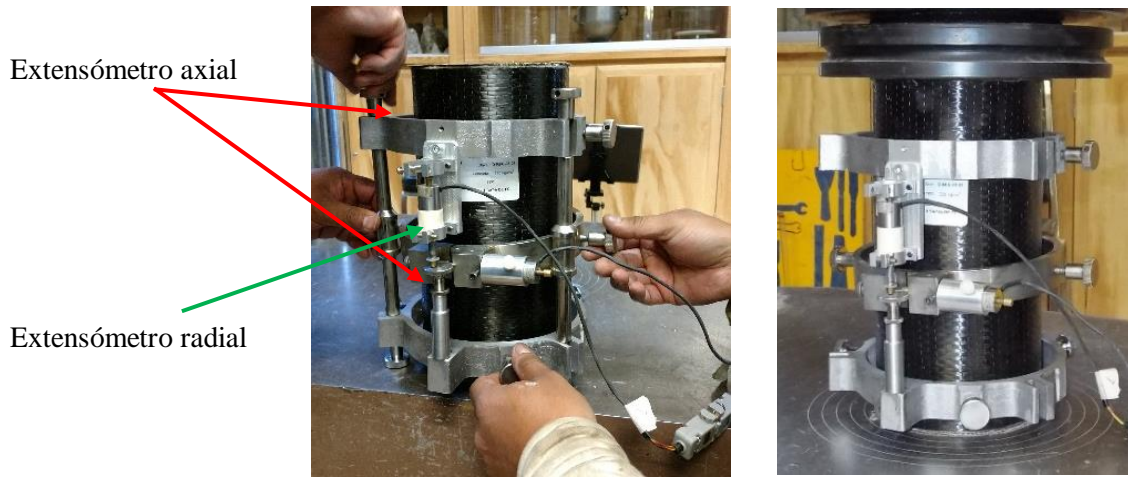
Las pruebas de compresión axial se dividieron en dos etapas para obtener el módulo de elasticidad, resistencia máxima y curvas de carga-deformación de cada espécimen.

Las etapas se describen a continuación:

- Primera etapa

Cada cilindro fue instrumentado con un extensómetro axial y uno radial (Figura 3.11) y fueron sometidos a carga axial, con la finalidad de determinar el módulo de elasticidad de los especímenes.

Los extensómetros, detectaron los decrementos e incrementos de la altura y diámetro de los cilindros debido a la aplicación de carga axial, mediante una aguja retráctil, sin embargo, estos datos presentaron un signo negativo ya que la aguja al contraerse midió deformaciones negativas. Adicionalmente, al colocar el extensómetro, la aguja se contrajo para estar en contacto con la superficie del cilindro, por tal motivo, las gráficas esfuerzo-deformación no comenzaron en el origen (Figura 3.11).



Instrumentación del cilindro en la máquina universal

Figura 3.11. Instrumentación de extensómetros en cilindro sometido a prueba de carga axial

Para determinar el módulo de elasticidad del concreto se aplicó cinco ciclos de carga y descarga dentro del intervalo elástico de este (aproximadamente 40% de la capacidad máxima), con una velocidad de 0.5 mm/min, con ello se obtuvieron curvas carga-deformación. En las Figuras 3.12 y 3.13 se presenta la curva carga-deformación de uno de los especímenes.

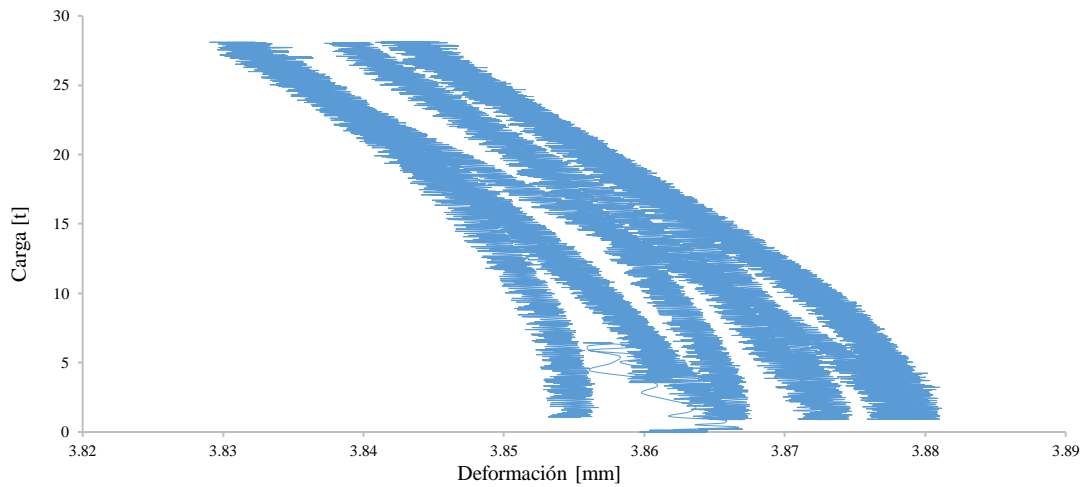


Figura 3.12. Gráfica carga-deformación (cilindro con una capa de fibra de carbono como refuerzo), extensómetro radial

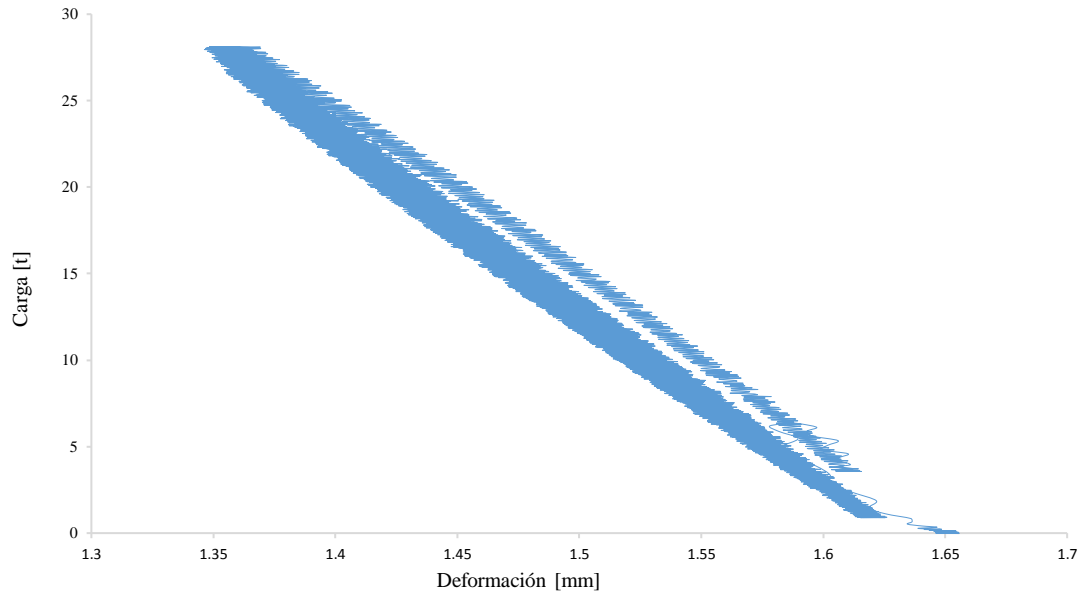


Figura 3.13. Gráfica carga-deformación (cilindro con una capa de fibra de carbono como refuerzo), extensómetro axial

- Segunda etapa

En la segunda etapa de la prueba, los cilindros con y sin fibra de carbono fueron ensayados hasta llegar a la falla (Figura 3.14). De estas pruebas se obtuvieron las curvas carga-deformación a la falla de los cilindros de concreto (Figura 3.15).



Figura 3.14. Falla de cilindros sometidos a carga axial

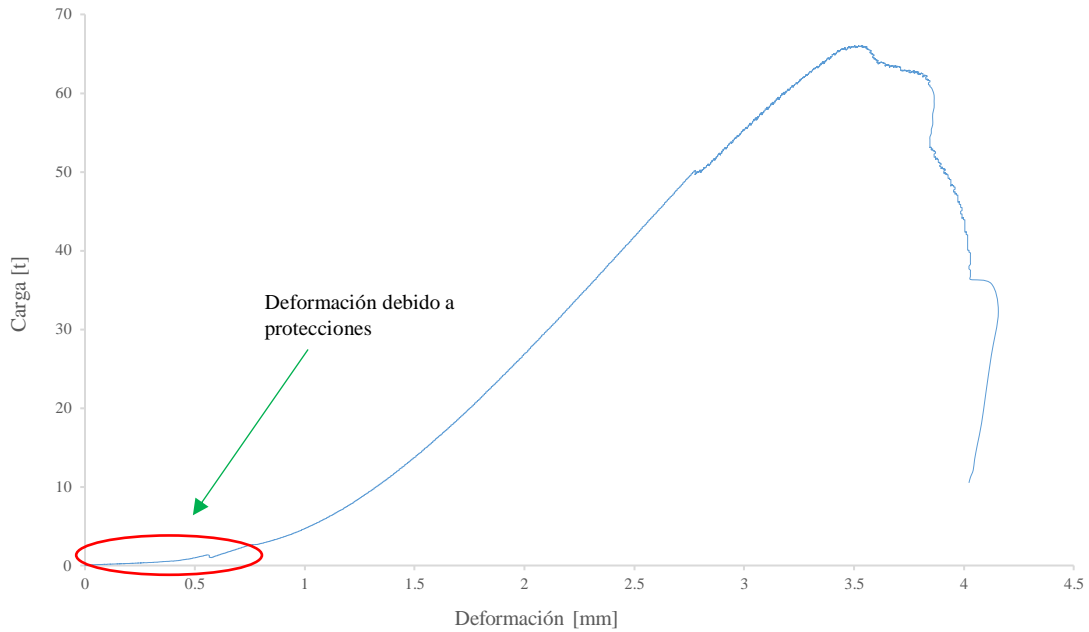


Figura 3.15. Gráfica carga-deformación (cilindro de control)

Para evitar daños en el equipo de laboratorio, y como sistema de cabeceo de los cilindros, se colocaron protecciones entre estos y la máquina universal, por lo que en la gráfica carga-deformación (Figura 3.15) se observa al comienzo de la gráfica una deformación aproximada de cuatro milímetros.



Figura 3.16. Uso de protecciones para evitar daños en la máquina universal y como sistema de cabeceo

En la Figura 3.17 se presenta el núcleo de un cilindro de concreto reforzado llevado a la falla, En él, el sistema PRFC confinó el concreto, incluso cuando este ya se había agrietado



a) Interior cilindro de concreto llevado a la falla



b) Conos formados debido a la compresión y tensión presentes en el cilindro

Figura 3.17. Interior de cilindro llevado a la falla a compresión con una capa de fibra de carbono como refuerzo

CAPÍTULO 4

OBTENCIÓN Y MANEJO DE RESULTADOS

4.1. Resultados obtenidos de las pruebas de compresión

De las pruebas de compresión axial de los cilindros de concreto, se obtuvieron datos del tiempo que duró cada prueba, deformación axial y radial, curva de capacidad (carga-deformación) y capacidad de carga máxima del concreto.

Los resultados de la primera etapa de las pruebas de compresión axial, se utilizaron para obtener los módulos de elasticidad de los especímenes. Para obtener las resistencias máximas de estos y las curvas de carga-deformación a la falla, se utilizaron los resultados de la segunda etapa de las pruebas. Con estos resultados, se ajustaron los datos de cada curva de capacidad de los cilindros.

4.2. Ajuste de los datos obtenidos de las pruebas de compresión

Debido a las incertidumbres y al ruido inherente de los sensores de la máquina universal, los resultados obtenidos de las pruebas se ajustaron. Este ajuste se dividió en dos partes; la primera consistió en obtener un factor de ajuste a partir de los módulos de elasticidad de cada espécimen. En la segunda parte, se ajustaron las curvas carga-deformación con el factor calculado.

A continuación, se describen los procedimientos:

4.2.1. Obtención del módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se obtuvo de las gráficas de carga y descarga captadas por el extensómetro axial; sin embargo, estas no comenzaron en el origen.

Estas curvas se normalizaron desplazándolas al origen, para ello se localizaron las ramas ascendentes (ramas de carga, Figura 4.1) y se definió un intervalo de 30% a 60% de la carga máxima aplicada en la prueba, descartando los datos fuera de este. Se obtuvo el primer valor de deformación registrado por el extensómetro y se restó a los demás valores de deformación.

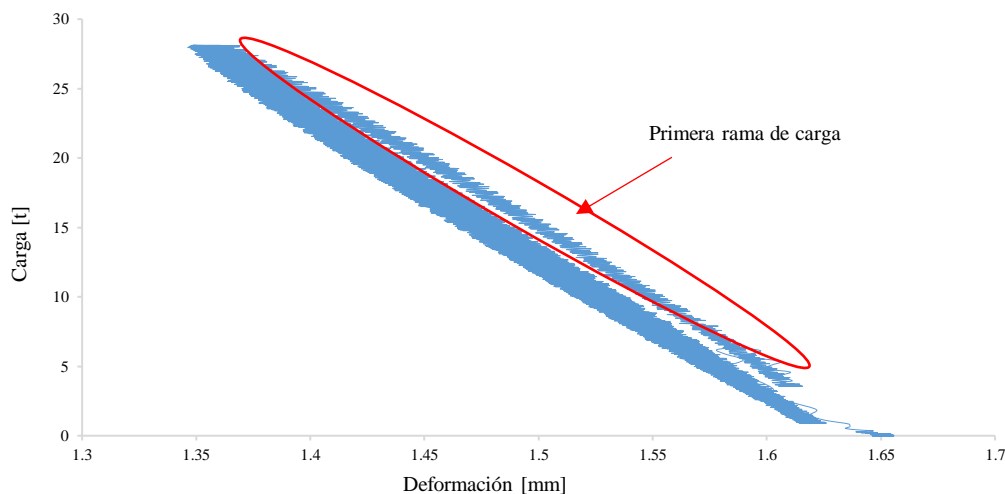


Figura 4.1. Resultados de la prueba de carga y descarga del espécimen RFC-1, extensómetro axial

Para identificar las ramas ascendentes (Figura 4.2), se calcularon los esfuerzos de cada incremento de carga y se graficó la curva esfuerzo-deformación. Esta se multiplicó por menos uno para invertir su sentido. Las ramas descendentes se descartaron.

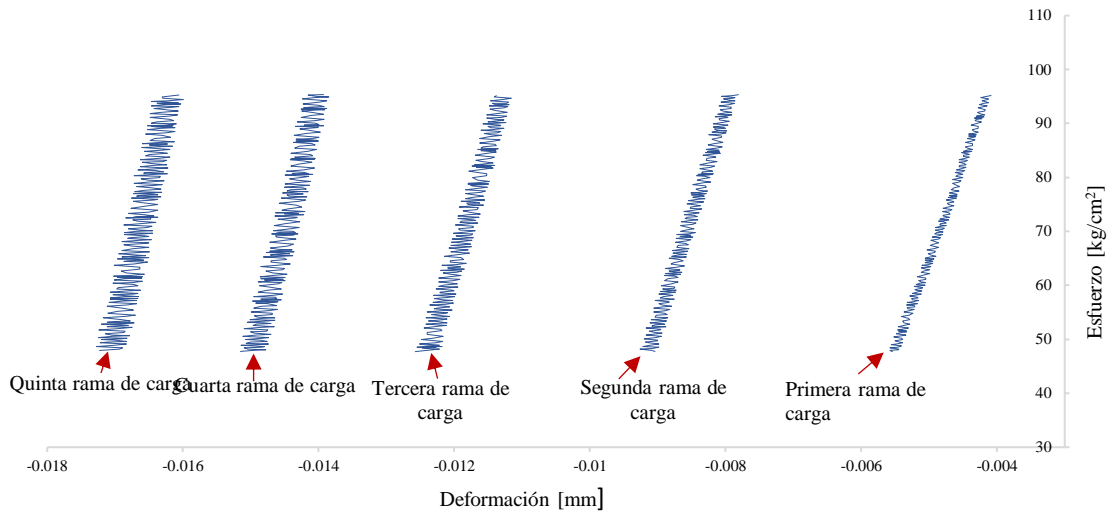


Figura 4.2. Curva esfuerzo-deformación del espécimen D-RFC-02-01, ramas de carga

Debido a la frecuencia de muestreo con la que se registraron las pruebas, fue necesario obtener puntos intermedios de los esfuerzos menores y mayores en las ramas de ascenso (Figura 4.3) y, a partir de estos, se calculó la línea de tendencia y la ecuación de la misma. En la Figura 4.4 se presenta la línea de tendencia y ecuación de la primera rama de carga de la prueba del espécimen D-RFC-02-01.

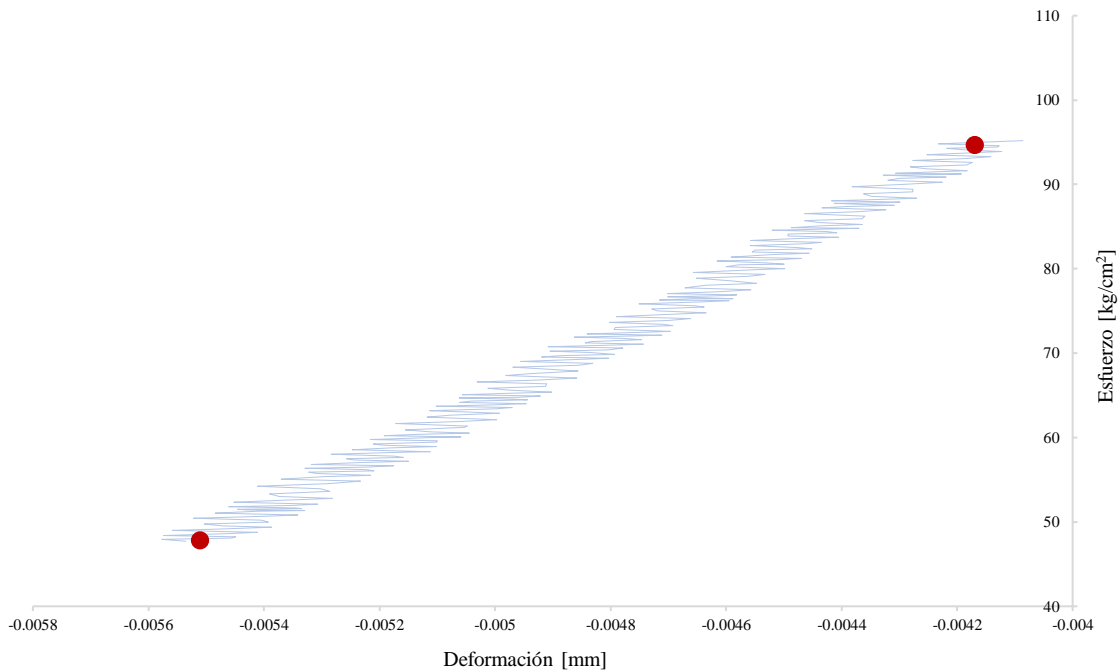


Figura 4.3. Puntos medios de los esfuerzos máximo y mínimo de la primera rama de carga, espécimen D-RFC-02-01

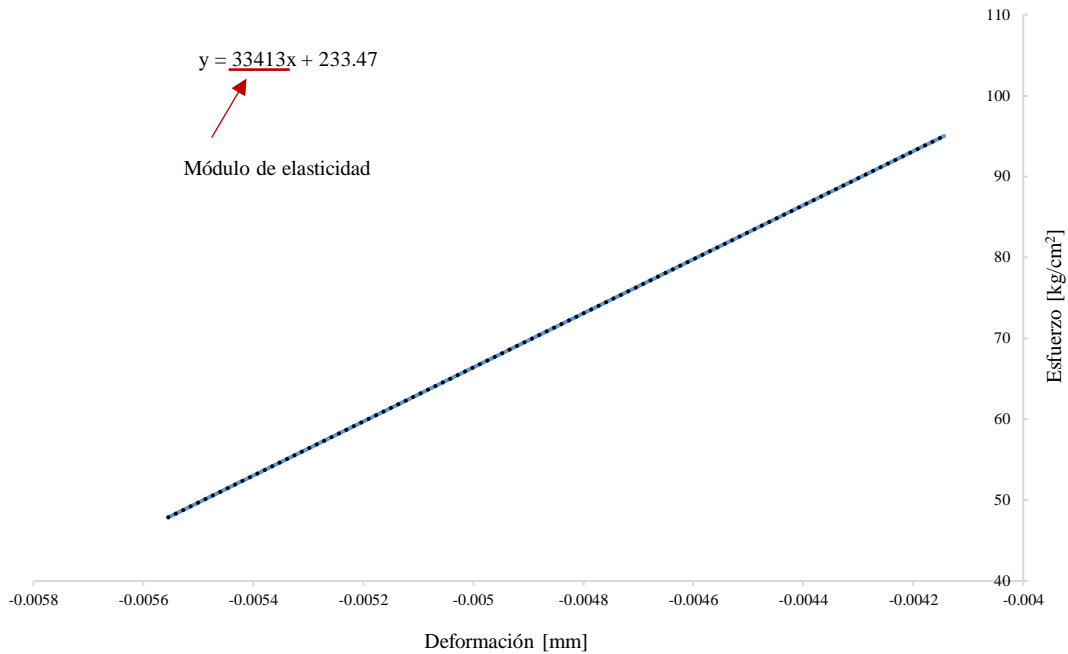


Figura 4.4. Obtención del módulo de elasticidad del espécimen D-RFC-02-01

Este procedimiento se realizó para las demás ramas de carga. Por lo que, se obtuvieron cinco líneas de tendencia y sus respectivas ecuaciones. Posteriormente, se calculó el valor promedio de las pendientes de las líneas de tendencia; este valor se definió como el módulo de elasticidad del espécimen.

A continuación, como ejemplo, se presenta la obtención del módulo de elasticidad del espécimen D-RFC-02-01 (Tabla 4.1), en donde se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 45,021.6 kg/cm² representando la rigidez del concreto con las condiciones de refuerzo de la Tabla 3.1 ante carga axial.

Tabla 4.1. Módulos de elasticidad de ramas ascendentes. Especimen D-RFC-02-01

	Módulo de elasticidad [kg/cm ²]
Rama de carga 1	33,413
Rama de carga 2	40,177
Rama de carga 3	46,437
Rama de carga 4	50,192
Rama de carga 5	54,889
Promedio	45,021.6

Para los demás cilindros se realizó el mismo procedimiento, los resultados se presentan en el subcapítulo 4.3.

4.2.2. Ajuste de curvas de capacidad

A partir de los datos de la segunda etapa de las pruebas, se graficó la carga aplicada contra la deformación, se determinó la carga máxima (Figura 4.5), y se definió el intervalo de cargas del 30% y 60%.

Se descartaron los valores fuera de este intervalo.

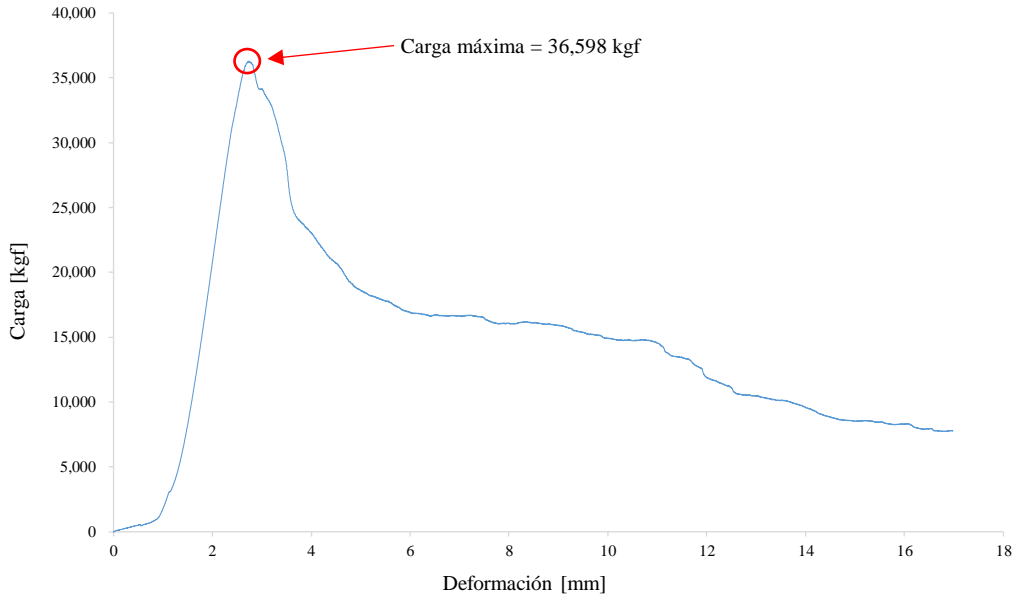


Figura 4.5. Gráfica carga-deformación. Especimen D-RFC-01-01

Se definió un intervalo del 30% al 100% de la carga máxima. A partir de este, se obtuvo una línea de tendencia de los puntos de muestreo y la ecuación de la misma (Figura 4.6).

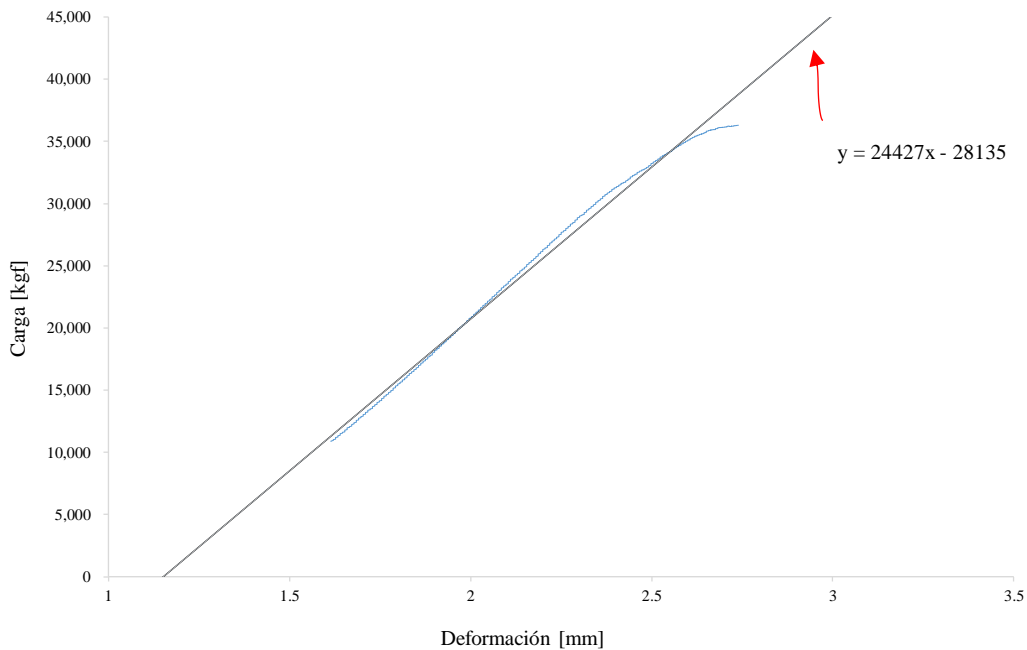


Figura 4.6. Pendiente de la línea de tendencia. Especimen D-RFC-01-01

Para normalizar las curvas carga-deformación, la pendiente de la recta se dividió entre el punto de corte de esta con el eje de las ordenadas y se multiplicó por menos uno debido al signo que presentó la ecuación. Este valor se restó a todos los valores de deformación y se graficaron con su correspondiente carga como se muestra en la Figura 4.7.

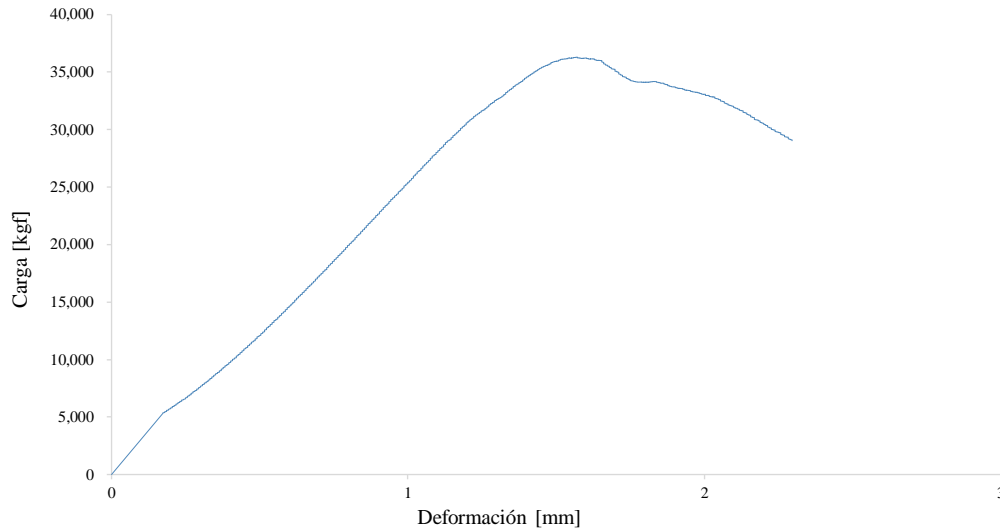


Figura 4.7. Gráfica de falla corregida. Espécimen D-RFC-01-01

Se calculó un factor de corrección para ajustar la gráfica de falla utilizando el módulo de elasticidad obtenido y los siguientes factores:

- **Deformación del cilindro:** división de la deformación (obtenida de la prueba de compresión), entre la altura de cada cilindro.
- **Esfuerzo ejercido en el cilindro:** división de la carga aplicada entre el área circular del cilindro.
- **Recta de ajuste:** multiplicación de la deformación del cilindro (obtenida de la gráfica de falla corregida, Figura 4.7) por el módulo de elasticidad.
- **Factor de ajuste:** se obtuvo un intervalo de esfuerzo máximo del 30% y 60%, localizándolos en los datos de la recta de ajuste y los esfuerzos calculados, se obtuvieron sus deformaciones asociadas. Se dividieron las deformaciones de los datos de esfuerzo entre la deformación de los datos de la recta de ajuste, obteniendo dos factores. Se estimó el promedio de ambos, este representó factor de ajuste.

Se toma como ejemplo la Tabla 4.2 para el espécimen D-RFC-02. Algunos factores no fueron calculados debido a la falta de datos.

Tabla 4.2. Factor de ajuste para el subgrupo 4A. Espécimen D-RFC-02

	Factor de ajuste
D-RFC-02-01	0.8
D-RFC-02-02	-
D-RFC-02-03	0.41
D-RFC-02-04	0.31
D-RFC-02-05	0.42
D-RFC-02-06	0.39
D-RFC-02-07	-
Factor de ajuste promedio	0.47

Finalmente, la curva de falla (carga-deformación) corregida, se obtuvo multiplicando la curva registrada por la máquina universal por el factor de corrección, como se muestra en la Figura 4.8.

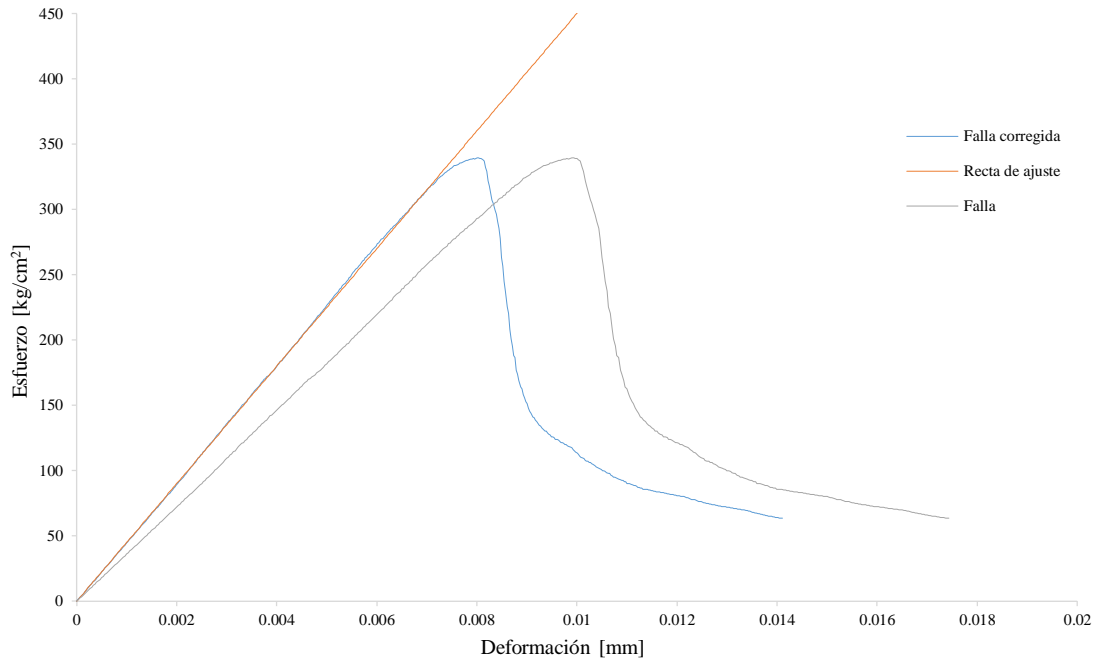


Figura 4.8. Gráfica de falla corregida con el factor de ajuste. Espécimen D-RFC-02-01

Se realizaron los mismos procedimientos para los demás especímenes y se obtuvieron gráficas de falla, rectas y factores de ajuste de todos los subgrupos. A partir de ellas, se obtuvieron promedios para graficar curvas de falla promedio como se presenta en la Figura 4.9.

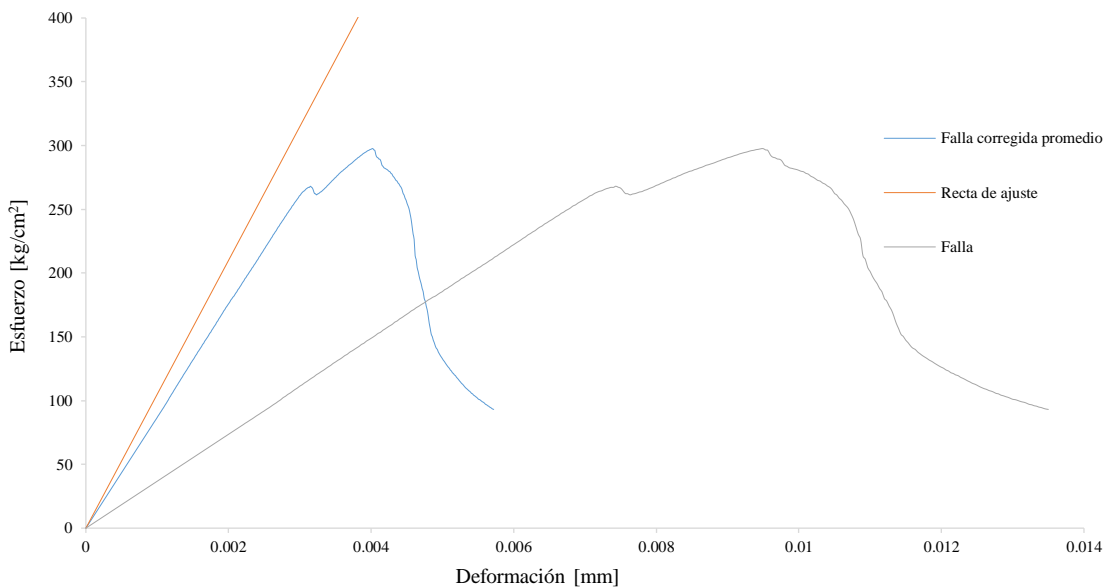


Figura 4.9. Gráfica de falla promedio corregida con factor de ajuste promedio. Cilindros con daño simulado, rehabilitados con dos capas de fibra de carbono

Se observa que la gráfica de falla corregida promedio se ajusta a la recta promedio, representando el comportamiento a la falla de cada cilindro que compone el subgrupo.

4.3. Resultados

De la Figura 4.10 a 4.19, se presentan las gráficas de falla de todos los subgrupos.

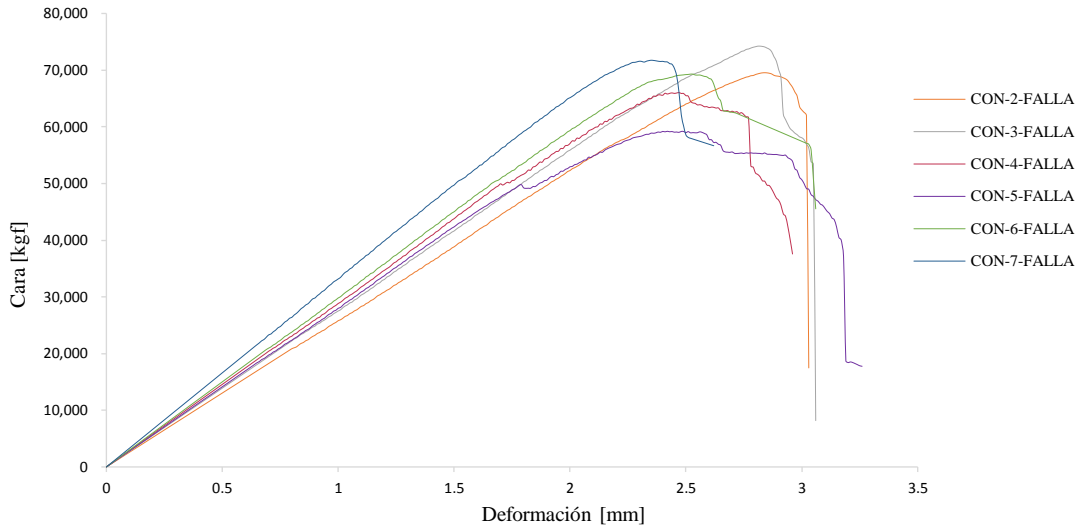


Figura 4.10. Gráficas de falla corregidas. Cilindros de control

En la Figura 4.10, las curvas a la falla de los cilindros sin refuerzo presentaron capacidades de deformación similares entre sí.

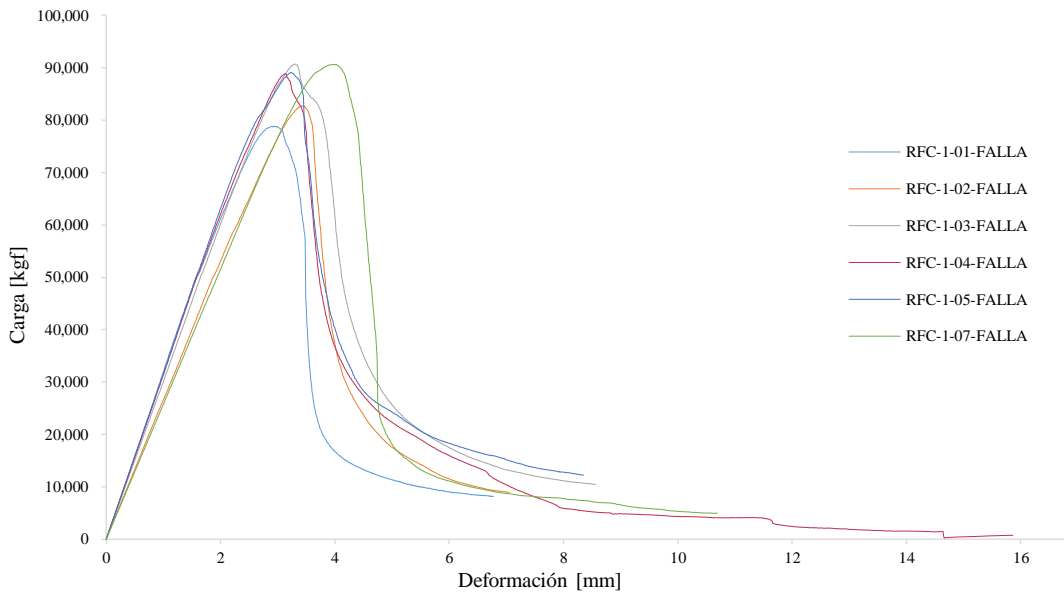


Figura 4.11. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con una capa de fibra de carbono como refuerzo

En la Figura 4.11, para los cilindros con una capa de refuerzo de fibra de carbono, la resistencia y la capacidad de deformación aumentaron en comparación a los cilindros de control.

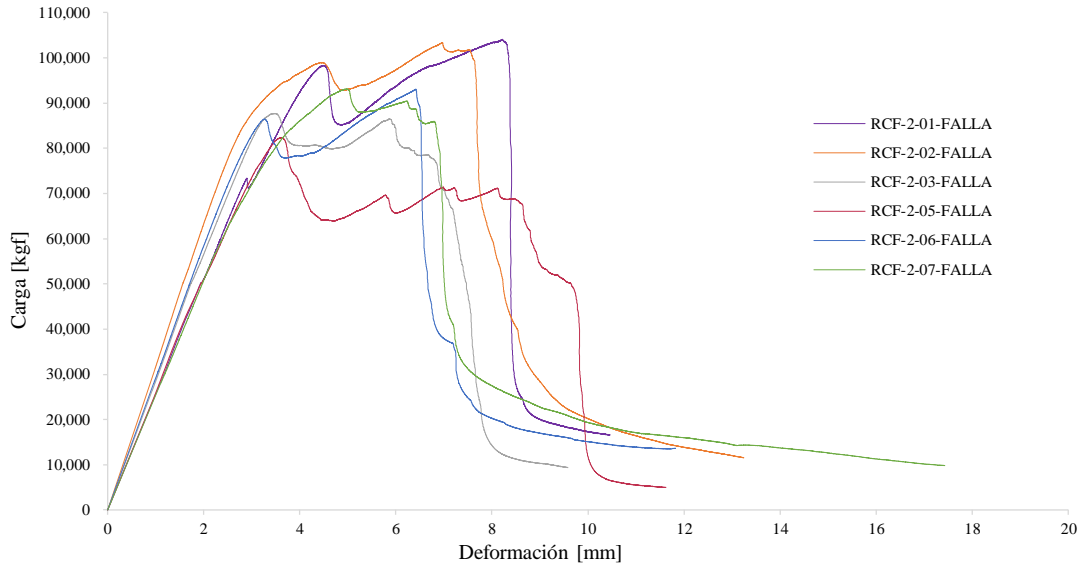


Figura 4.12. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con dos capas de fibra de carbono como refuerzo

En la Figura 4.12 el refuerzo de dos capas de fibra de carbono presentó un aumento en su resistencia y su capacidad de deformación en comparación a los cilindros de control y a los reforzados con una capa de fibra de carbono.

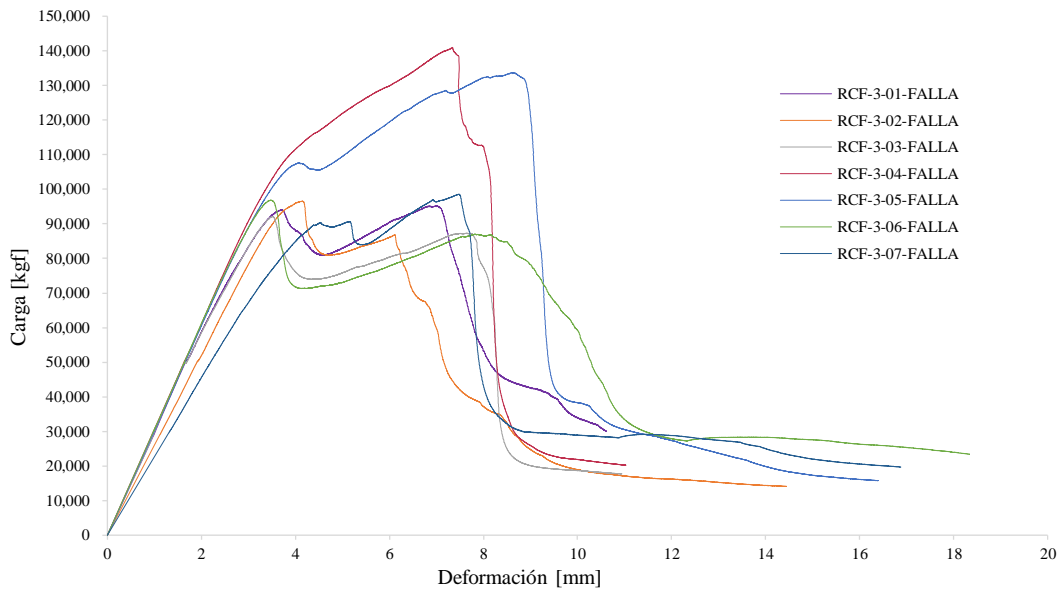


Figura 4.13. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con tres capas de fibra de carbono como refuerzo

En la Figura 4.13, los cilindros con tres capas de fibra de carbono obtuvieron mayores resistencias y capacidades de deformación en comparación a los subgrupos con una y dos capas de fibra de carbono como refuerzo.

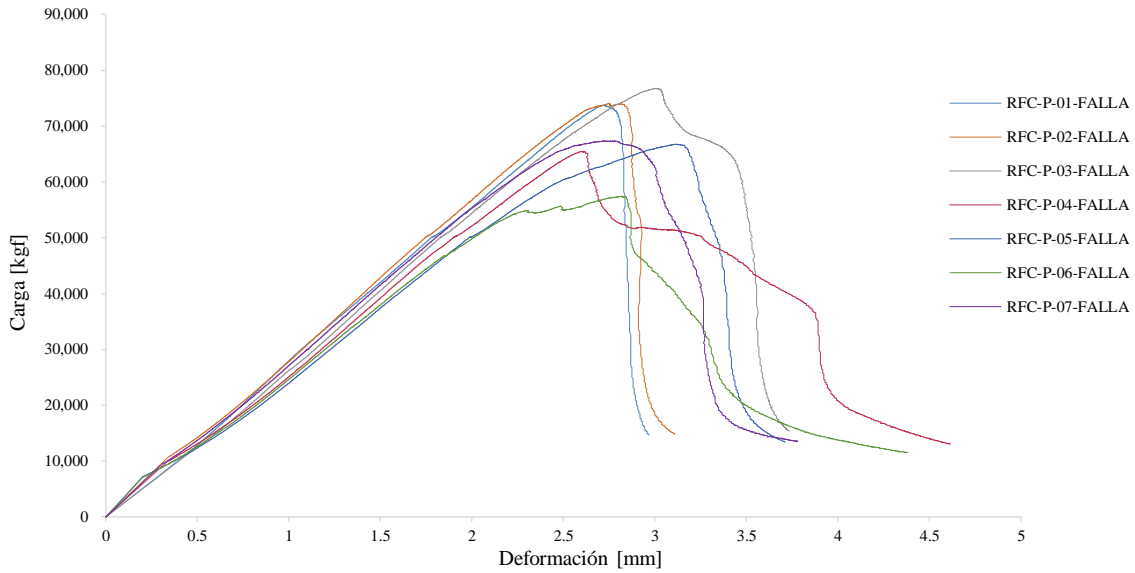


Figura 4.14. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con recubrimiento parcial de fibra de carbono

En la gráfica 4.14, el refuerzo parcial de fibra de carbono no aportó gran resistencia como en los casos anteriores, sin embargo, las resistencias y capacidades de deformación son similares a los cilindros de control.

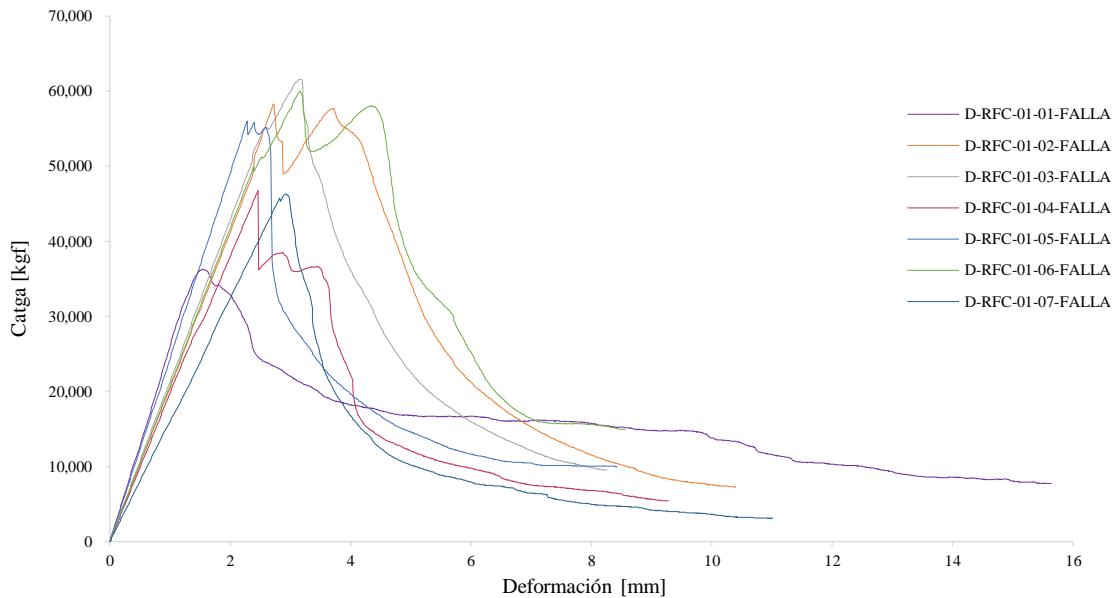


Figura 4.15. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con daño simulado rehabilitados con una capa de fibra de carbono

En la Figura 4.15, se observa que los cilindros dañados y reparados con una capa de fibra de carbono adquirieron menor resistencia en comparación con los cilindros de control.

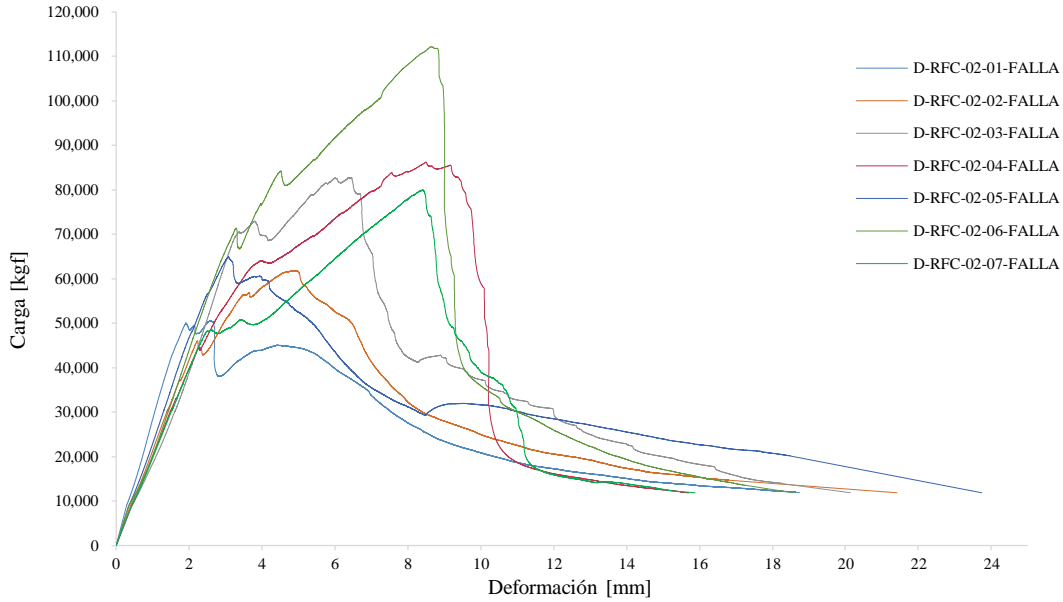


Figura 4.16. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con daño simulado rehabilitados con dos capas de fibra de carbono

En la Figura 4.16, se observa que los resultados obtenidos del refuerzo de dos capas de fibra de carbono en cilindros dañados, son similar al subgrupo con una capa de fibra como reforzamiento.

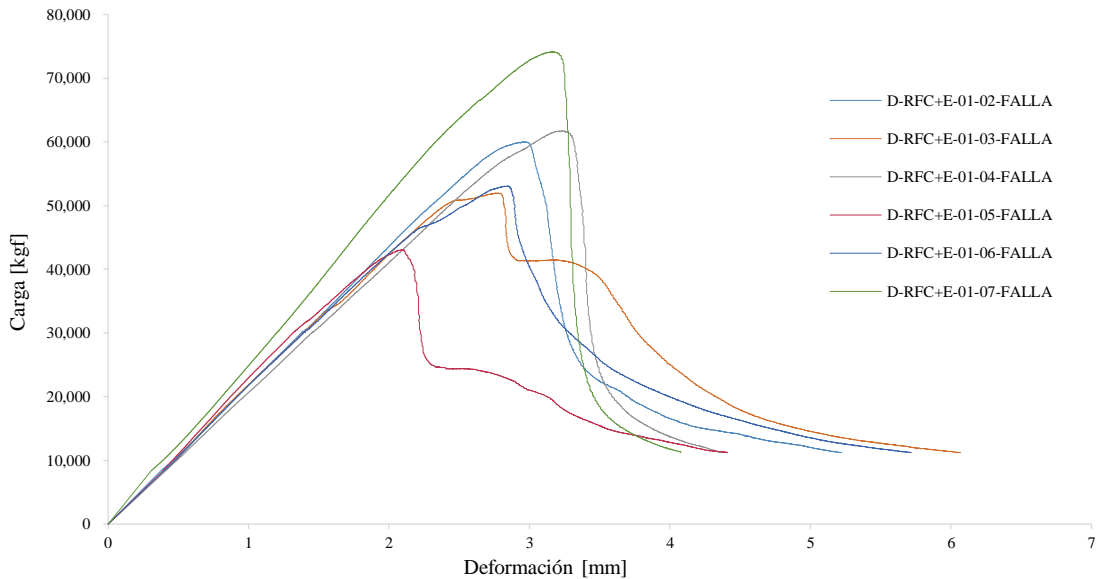


Figura 4.17. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con daño simulado reparados con resina epóxica y rehabilitados con una capa de fibra de carbono

En la Figura 4.17, se observa que la capacidad a carga axial para cilindros con daño, reparados con una capa de fibra de carbono y resina epóxica, fue similar a la presentada en el subgrupo de control.

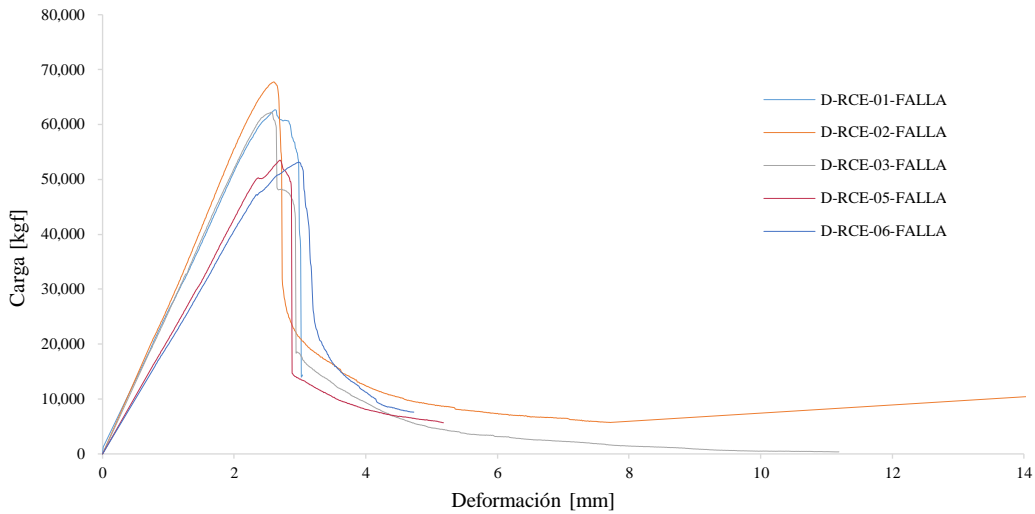


Figura 4.18. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con daño simulado rehabilitados con una capa de fibra de carbono

En la Figura 4.18, se observa que los especímenes dañados y reparados sólo con resina epóxica, no alcanzaron la resistencia mínima (cilindros de control).

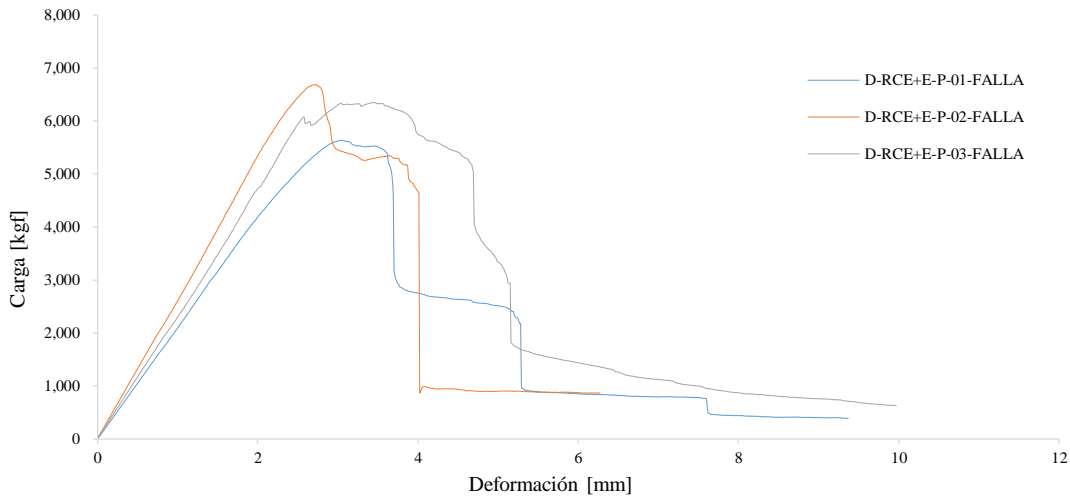


Figura 4.19. Gráficas de falla corregidas. Cilindros con daño simulado reparados con resina epóxica

En la Figura 4.19 se observa que, para los cilindros con daño, reparados con resina y reforzados parcialmente con fibra de carbono, la resistencia fue inferior a los cilindros de control, sin embargo, las capacidades de deformación fueron mayores y semejantes a los especímenes con una capa de fibra.

A diferencia de las gráficas de los cilindros de control, los demás subgrupos presentaron comportamientos elásticos debido a la fibra de carbono. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de los esfuerzos obtenidos para cada cilindro.

Tabla 4.3. Esfuerzos calculados para cada espécimen

Grupo	Subgrupo	Clave de espécimen	Esfuerzo [kg/cm ²]	Esfuerzo promedio [kg/cm ²]
1	1A	CON-01	-	386.79
		CON-02	393.53	
		CON-03	420.07	
		CON-04	373.74	
		CON-05	335.09	
		CON-06	392.14	
		CON-07	406	
	1B	RFC-1-01	446.18	491.27
		RFC-1-02	468.06	
		RFC-1-03	513.31	
		RFC-1-04	502.94	
		RFC-1-05	504.12	
		RFC-1-06	-	
		RFC-1-07	513.01	
2	2A	RFC-2-01	589.1	531.62
		RFC-2-02	585.1	
		RFC-2-03	496.27	
		RFC-2-04	-	
		RFC-2-05	465.91	
		RFC-2-06	526.65	
		RFC-2-07	526.66	
	2B	RFC-3-01	538.34	609.40
		RFC-3-02	546.21	
		RFC-3-03	521.21	
		RFC-3-04	797.84	
		RFC-3-05	756.7	
		RFC-3-06	547.83	
		RFC-3-07	557.65	
3	3A	RFC-P-01	417.52	389.39
		RFC-P-02	419.20	
		RFC-P-03	434.48	
		RFC-P-04	370.60	
		RFC-P-05	377.79	
		RFC-P-06	325.09	
		RFC-P-07	381.05	
	3B	D-RFC-01-01	205.44	288.57
		D-RFC-01-02	330.13	
		D-RFC-01-03	348.65	
		D-RFC-01-04	217.92	
		D-RFC-01-05	315.99	
		D-RFC-01-06	339.87	
		D-RFC-01-07	261.96	
4	4A	D-RFC-02-01	286.23	435.19
		D-RFC-02-02	349.6	
		D-RFC-02-03	468.22	
		D-RFC-02-04	487.84	
		D-RFC-02-05	367.44	
		D-RFC-02-06	634.5	
		D-RFC-02-07	452.48	
	4B	D-RFC+E-01-01	339.57	324.30
		D-RFC+E-01-02	293.96	
		D-RFC+E-01-03	349.22	
		D-RFC+E-01-04	243.49	
		D-RFC+E-01-05	300.07	
		D-RFC+E-01-06	419.5	
		D-RFC+E-01-07	-	

Grupo	Subgrupo	Clave de espécimen	Esfuerzo [kg/cm ²]	Esfuerzo promedio [kg/cm ²]
5	5A	D-RCE-01	354.79	338.75
		D-RCE-02	383.43	
		D-RCE-03	352.18	
		D-RCE-04	-	
		D-RCE-05	302.69	
		D-RCE-06	300.63	
		D-RCE-07	-	
	5B	D-RFC+E-P-01	31.90	35.23
		D-RFC+E-P-02	37.85	
		D-RFC+E-P-03	35.93	

No todos los especímenes presentaron esfuerzos debido a una mala colocación de los aparatos (extensómetros radiales y axiales), por ello, no se calcularon para dichos casos.

En algunos grupos, los valores de los esfuerzos fueron mayores a los del concreto con los que fue diseñada la mezcla, sin embargo, en otros se presentaron esfuerzos menores. La fibra aportó mayor resistencia, esta dependió del número de capas utilizadas.

En la Tabla 4.4, se presentan los valores de los módulos de elasticidad de cada subgrupo y su correspondiente promedio.

Tabla 4.4. Módulos de elasticidad calculados para cada espécimen

Grupo	Subgrupo	Clave de espécimen	Módulo de elasticidad [kg/cm ²]	Módulo de elasticidad promedio [kg/cm ²]
1	1A	CON-01	-	77,739.03
		CON-02	71228.58	
		CON-03	81559.05	
		CON-04	74115.9	
		CON-05	73052.12	
		CON-06	78032.39	
		CON-07	88446.15	
	1B	RFC-1-01	119552.87	95,060.16
		RFC-1-02	83252.45	
		RFC-1-03	93329.95	
		RFC-1-04	96823.57	
		RFC-1-05	98206.55	
		RFC-1-06	-	
		RFC-1-07	79195.57	
2	2A	RFC-2-01	-	102,827.17
		RFC-2-02	-	
		RFC-2-03	-	
		RFC-2-04	-	
		RFC-2-05	-	
		RFC-2-06	-	
		RFC-2-07	-	
	2B	RFC-3-01	121461.79	97,726.79
		RFC-3-02	74932.08	
		RFC-3-03	100997.81	
		RFC-3-04	81169.43	
		RFC-3-05	94811.34	
		RFC-3-06	102097.27	
		RFC-3-07	108617.84	

Grupo	Subgrupo	Clave de espécimen	Módulo de elasticidad [kg/cm ²]	Módulo de elasticidad promedio [kg/cm ²]
3	3A	RFC-P-01	70678.97	84,862.2
		RFC-P-02	82844.98	
		RFC-P-03	85651.03	
		RFC-P-04	92445.18	
		RFC-P-05	90388.92	
		RFC-P-06	94143.24	
		RFC-P-07	77883.06	
	3B	D-RFC-01-01	48818.34	80,153.05
		D-RFC-01-02	171428.29	
		D-RFC-01-03	59663.13	
		D-RFC-01-04	62326.74	
		D-RFC-01-05	76194.8	
		D-RFC-01-06	76684.88	
		D-RFC-01-07	65955.19	
4	4A	D-RFC-02-01	45021.6	104,921.03
		D-RFC-02-02	192912.4	
		D-RFC-02-03	83352	
		D-RFC-02-04	113875.20	
		D-RFC-02-05	83710.6	
		D-RFC-02-06	110654.4	
		D-RFC-02-07	-	
	4B	D-RFC+E-01-01	47194	98,350.06
		D-RFC+E-01-02	106020.4	
		D-RFC+E-01-03	127433.6	
		D-RFC+E-01-04	66610.2	
		D-RFC+E-01-05	132749.2	
		D-RFC+E-01-06	93427.4	
		D-RFC+E-01-07	115015.6	
5	5A	D-RCE-01	-	79,051.77
		D-RCE-02	65822.8	
		D-RCE-03	76227.6	
		D-RCE-04	59895.2	
		D-RCE-05	81687.2	
		D-RCE-06	99865.4	
		D-RCE-07	90812.4	
	5B	D-RFC+E-P-01	66691.8	86,870.3
		D-RFC+E-P-02	87063.6	
		D-RFC+E-P-03	106856.8	

No todos los especímenes presentaron módulo de elasticidad debido a una mala colocación de los aparatos (extensómetros radiales y axiales), por ello, no se calcularon para dichos casos.

Se observa que los valores de los módulos de elasticidad variaron de acuerdo con la cantidad de fibra de carbono utilizada. El mejor comportamiento se presentó en los grupos con dos capas de dicha fibra.

Para los factores de ajuste se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4.5, éstos representan la corrección de las gráficas carga deformación debido a las incertidumbres que presentó el sistema.

Tabla 4.5. Factores de corrección calculados para cada espécimen

Grupo	Subgrupo	Clave de espécimen	Factor de ajuste	Factor de ajuste promedio
1	1A	CON-01	-	0.59
		CON-02	0.55	
		CON-03	0.55	
		CON-04	0.61	
		CON-05	0.61	
		CON-06	0.59	
		CON-07	0.61	
	1B	RFC-1-01	0.55	0.55
		RFC-1-02	0.55	
		RFC-1-03	0.55	
		RFC-1-04	0.565	
		RFC-1-05	0.55	
		RFC-1-06	-	
		RFC-1-07	0.55	
2	2A	RFC-2-01	0.53	0.53
		RFC-2-02	0.52	
		RFC-2-03	0.52	
		RFC-2-04	-	
		RFC-2-05	0.52	
		RFC-2-06	0.53	
		RFC-2-07	0.53	
	2B	RFC-3-01	0.4	0.5
		RFC-3-02	0.59	
		RFC-3-03	0.49	
		RFC-3-04	0.63	
		RFC-3-05	0.53	
		RFC-3-06	0.5	
		RFC-3-07	0.35	
3	3A	RFC-P-01	0.68	0.57
		RFC-P-02	0.6	
		RFC-P-03	0.56	
		RFC-P-04	0.5	
		RFC-P-05	0.5	
		RFC-P-06	0.46	
		RFC-P-07	0.69	
	3B	D-RFC-01-01	0.9	0.57
		D-RFC-01-02	0.52	
		D-RFC-01-03	0.61	
		D-RFC-01-04	0.54	
		D-RFC-01-05	0.54	
		D-RFC-01-06	0.45	
		D-RFC-01-07	0.41	
4	4A	D-RFC-02-01	0.81	0.57
		D-RFC-02-02	0.18	
		D-RFC-02-03	0.42	
		D-RFC-02-04	0.32	
		D-RFC-02-05	0.42	
		D-RFC-02-06	0.39	
		D-RFC-02-07	-	
	4B	D-RFC+E-01-01	-	0.42
		D-RFC+E-01-02	0.36	
		D-RFC+E-01-03	0.3	
		D-RFC+E-01-04	0.55	
		D-RFC+E-01-05	0.26	
		D-RFC+E-01-06	0.4	
		D-RFC+E-01-07	0.4	

Grupo	Subgrupo	Clave de espécimen	Factor de ajuste	Factor de ajuste promedio
5	5A	D-RCE-01	0.51	0.51
		D-RCE-02	0.7	
		D-RCE-03	0.58	
		D-RCE-04	-	
		D-RCE-05	0.43	
		D-RCE-06	0.34	
		D-RCE-07	-	

No todos los especímenes presentaron factor de corrección debido a una mala colocación de los aparatos (extensómetros radiales y axiales), por ello, no se calcularon para dichos casos.

Los factores de corrección se encuentran en un intervalo de 0.38 a 0.57. Mayoritariamente son factores de 0.5 por lo que se presentó cierta similitud entre ellos.

En la Tabla 4.6, se presentan los factores de ajuste de cada subgrupo de las pruebas realizadas, con ellos se calculó un promedio general.

Tabla 4.6. Factores de corrección promedio

Factores de ajuste promedio	
CON	0.59
RFC-1	0.55
RFC-2	0.53
RFC-3	0.5
RFC-P	0.57
D-RFC-01	0.57
D-RFC-02	0.42
D-RFC+E-01	0.38
D-RCE	0.51
Promedio	0.51

El promedio de los factores de corrección indica el error que se tuvo al hacer las pruebas de compresión. Este error se puede atribuir a la mala colocación de la fibra, así como el secado de la resina epóxica.

En las Figuras 4.20 a 4.28, se presentan las gráficas de falla promedio ajustadas con el factor de ajuste promedio. Éstas representan las gráficas de falla corregidas utilizando las consideraciones descritas en este capítulo.

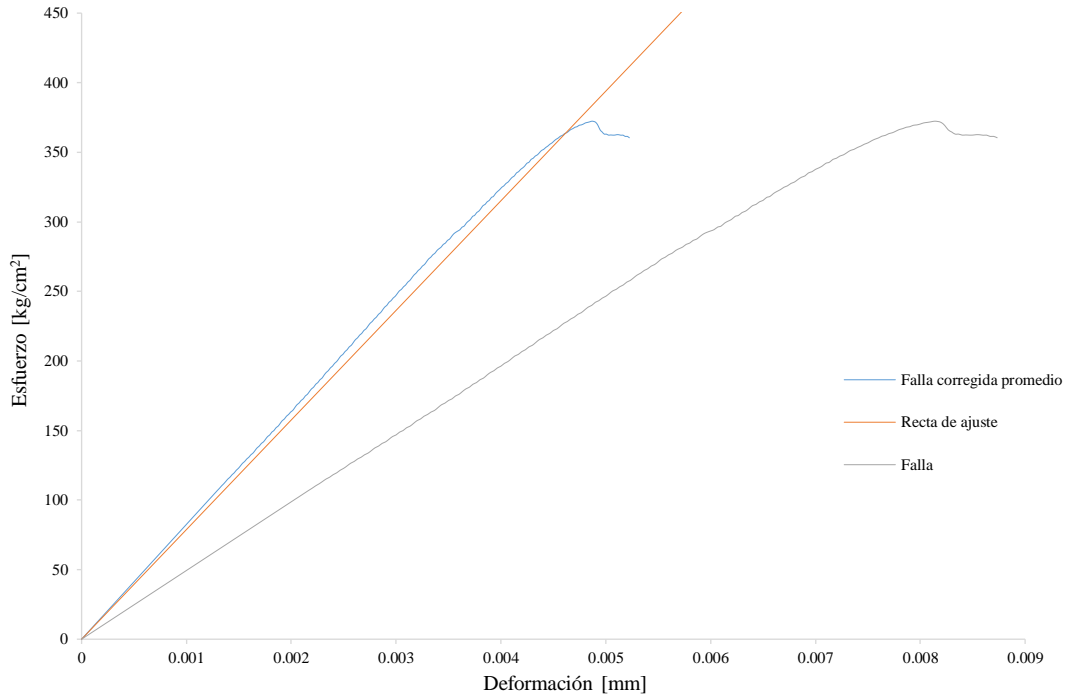


Figura 4.20. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros de control

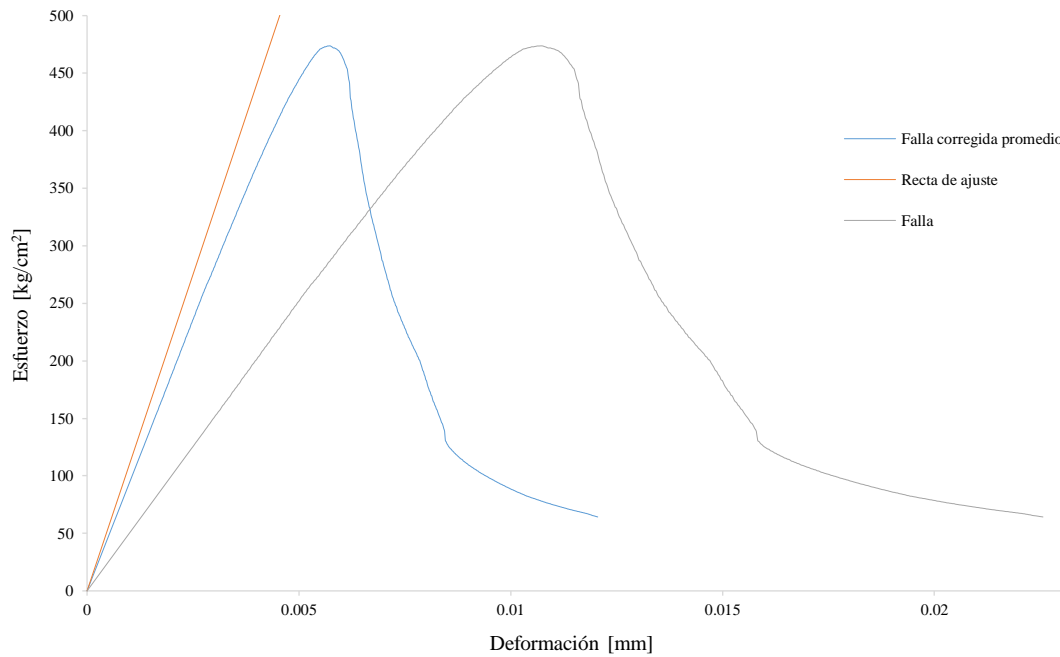


Figura 4.21. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con una capa de fibra de carbono como refuerzo

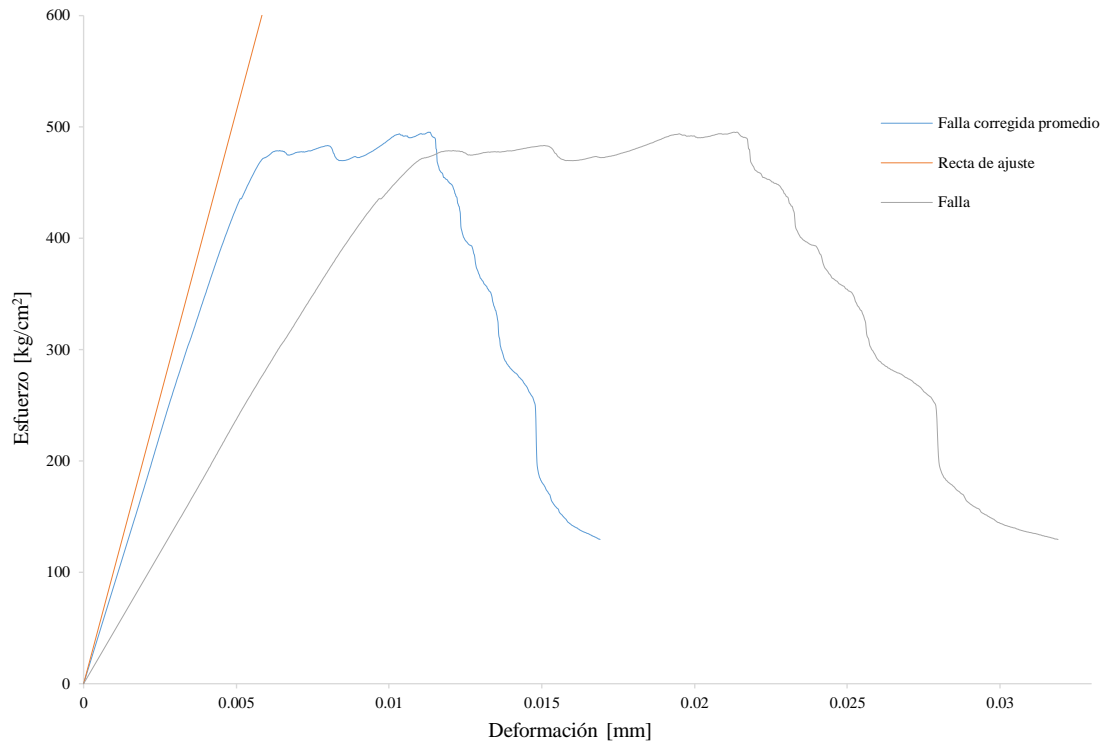


Figura 4.22. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con dos capas de fibra de carbono como refuerzo

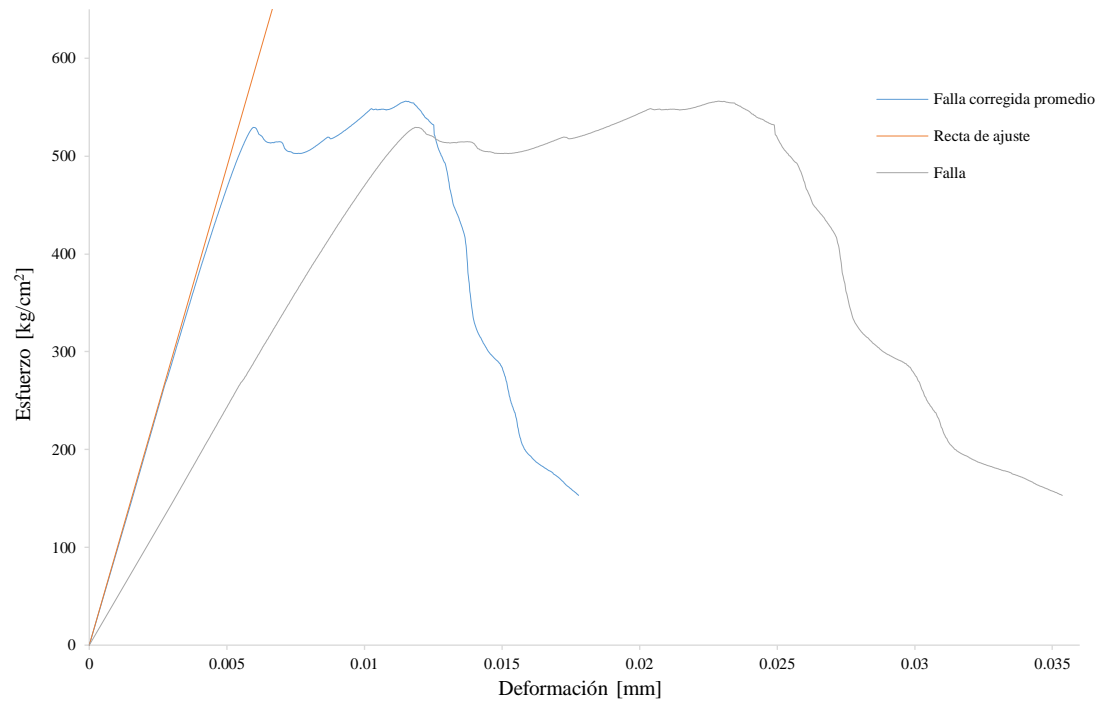


Figura 4.23. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con tres capas de fibra de carbono como refuerzo

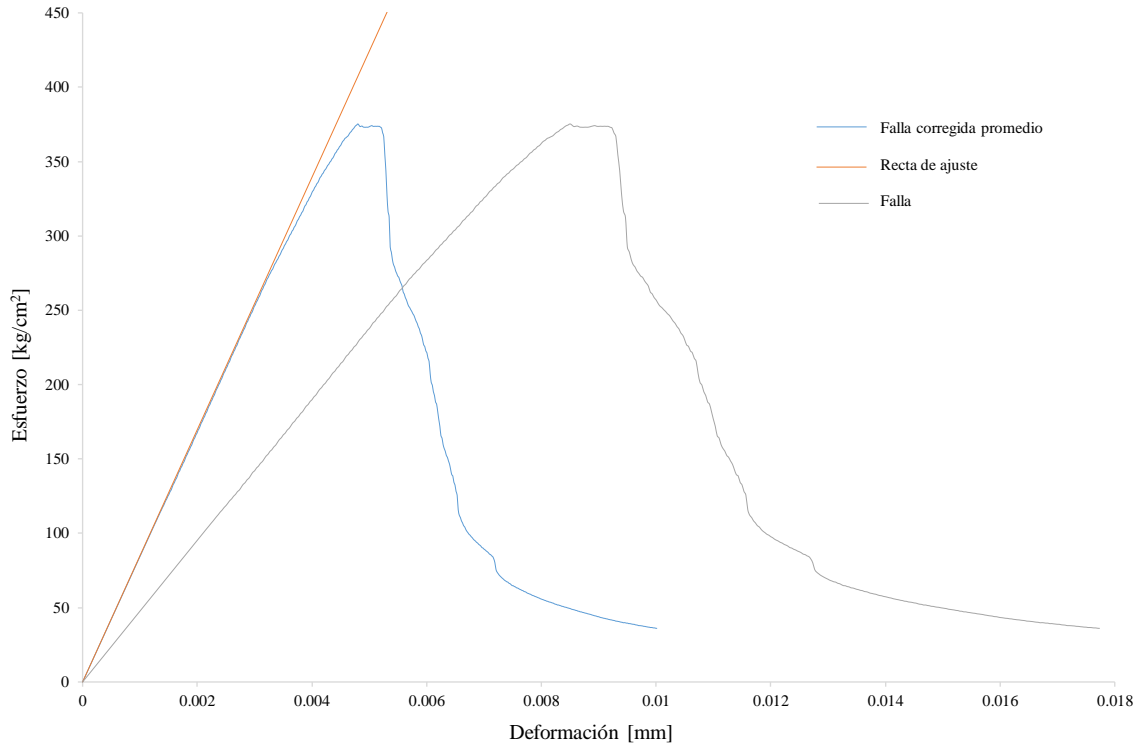


Figura 4.24. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con recubrimiento parcial de fibra de carbono

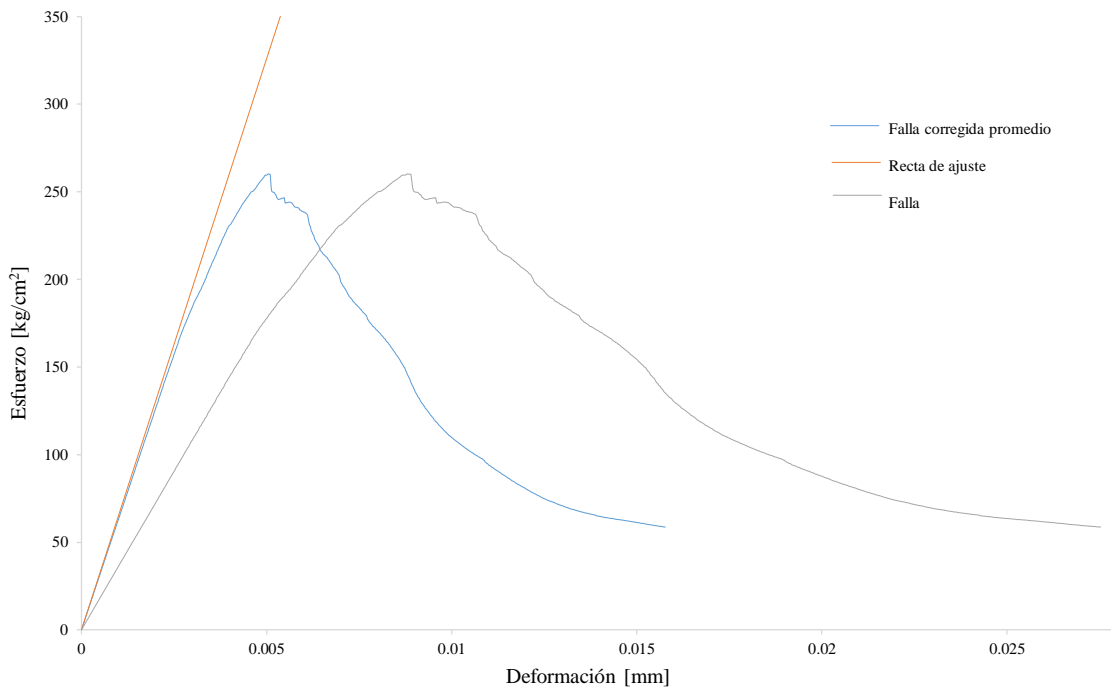


Figura 4.25. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con daño simulado rehabilitados con una capa de fibra de carbono

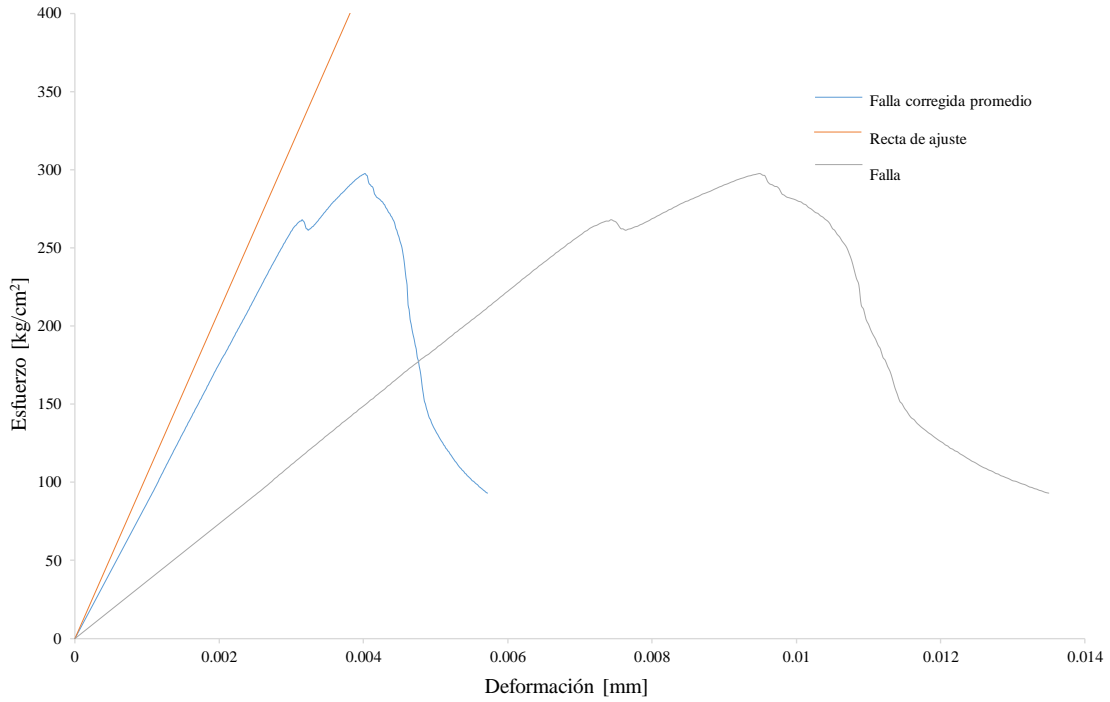


Figura 4.26. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con daño simulado rehabilitados con dos capas de fibra de carbono

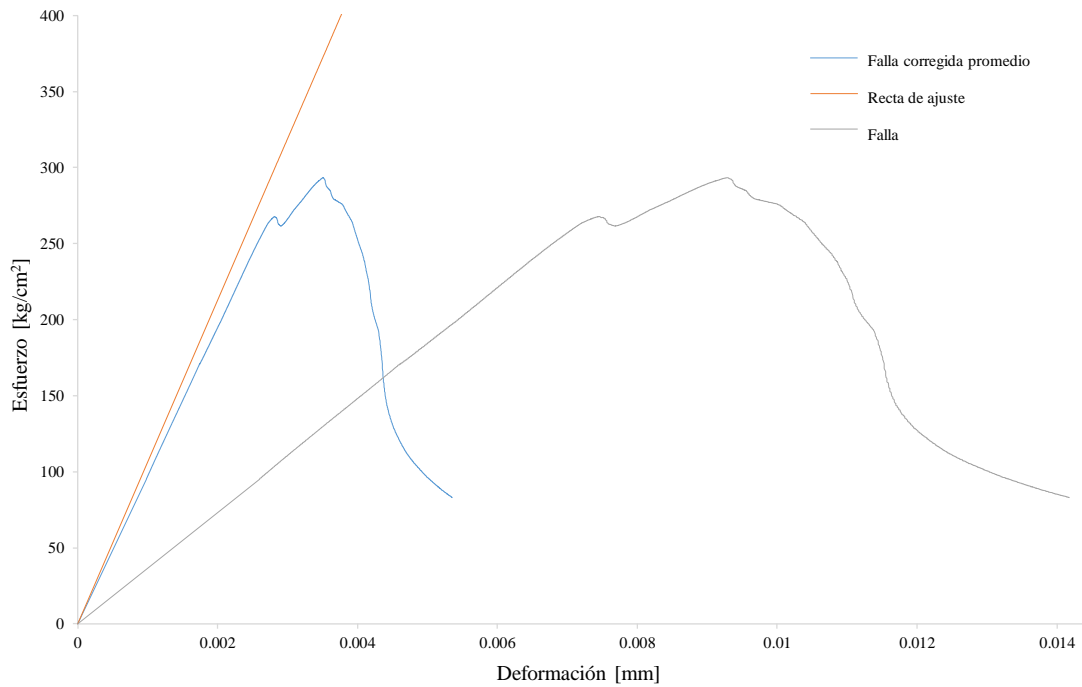


Figura 4.27. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Cilindros con daño simulado reparados con resina epóxica y rehabilitados con una capa de fibra de carbono

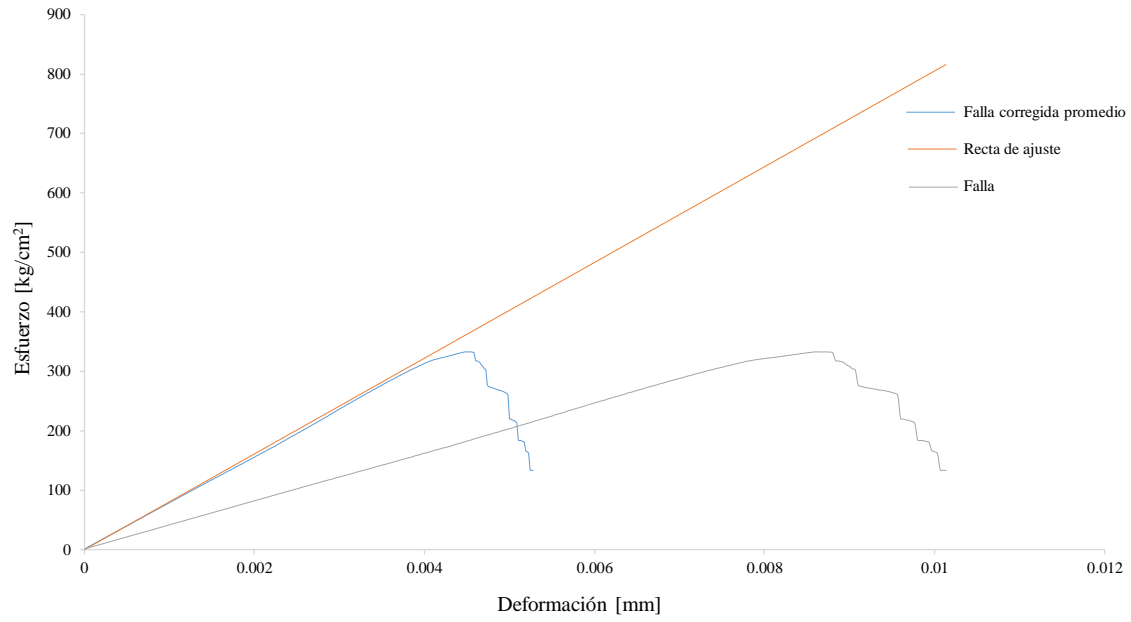


Figura 4.28. Curva esfuerzo-deformación promedio, corregida con el factor de ajuste promedio. Subgrupo Cilindros con daño simulado reparados con resina epóxica

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADOS CON PRF

5.1. Resistencia teórica de los especímenes utilizados

En el capítulo 4, se presentaron los resultados obtenidos de las pruebas de compresión axial, entre ellos la resistencia experimental de los cilindros. Esta se comparó con la resistencia teórica para conocer la efectividad de la fibra de carbono como sistema de refuerzo.

El procedimiento utilizado para calcular la resistencia teórica de todos los especímenes, se indica en la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008), utilizando los parámetros de la Tabla 5.1 y las ecuaciones 1 a 7 descritas a continuación (Sika AG):

Tabla 5.1. Parámetros para calcular la resistencia teórica de todos los cilindros

Diámetro de los cilindros	15 cm
Resistencia del concreto (obtenida de las pruebas de compresión)	386.8 kg/cm ²

Número de capas de fibra de carbono necesarias para reforzar el elemento.

$$n = \frac{f_1 \sqrt{b^2 + h^2}}{\psi_f 2E_f t_f \varepsilon_{fe}} \quad (\text{ec. 1})$$

donde

n, número de capas de fibra a utilizar;

f_1 , presión máxima de confinamiento en la fibra de carbono (kg/cm²), calculada con la ecuación 2;

b y h, base y altura del elemento rectangular al que se aplica recubrimiento con fibra, para secciones circulares en la Figura 5.1 se muestra la equivalencia;

ψ_f , factor de reducción de la fuerza;

E_f , módulo de elasticidad de la fibra (kg/cm²), presentada en la Tabla 5.2;

t_f , espesor nominal de la lámina de la fibra de carbono (cm), presentada en la Tabla 5.2;

ε_{fe} , nivel efectivo de deformación en el refuerzo de la fibra de carbono logrado en caso de falla, que se obtiene con la ecuación 3.

De acuerdo con la norma ACI 440.2R-08 (ACI 440, 2008) se utilizó un factor de reducción de la fuerza igual a 0.85 para recubrimientos parciales de 2 o 3 tiras en forma de U y 0.95 para secciones completamente forradas con la fibra

En la Tabla 5.2, se presentan las propiedades mecánicas de la fibra de carbono utilizadas en este trabajo y en la Figura 5.1 la equivalencia de dimensiones entre secciones circulares y rectangulares.

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono

Esesor nominal de la lámina	0.1 cm
Resistencia última a tensión*	6320 kg/cm ²
Deformación de ruptura última	0.018 cm/cm
Módulo de elasticidad*	387500 kg/cm ²

*Se contempla el uso de la resina epóxica y sus propiedades mecánicas.

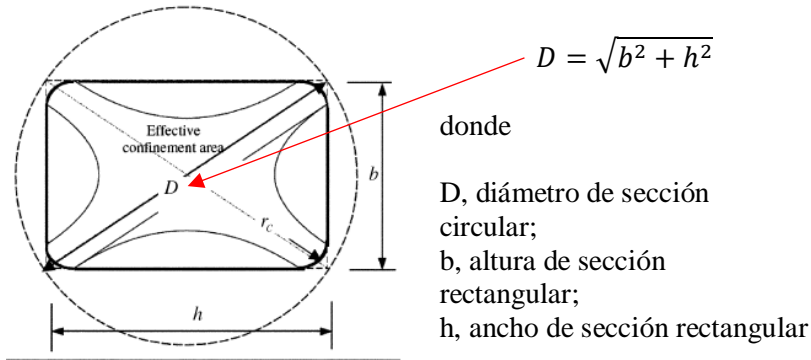


Figura 5.1. Dimensiones equivalentes para secciones circulares y rectangulares según la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008)

Presión máxima de confinamiento.

$$f_1 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{3.3k_a} \quad (\text{ec. 2})$$

donde

f_1 , presión máxima de confinamiento en la fibra de carbono (kg/cm²);

f'_{cc} , esfuerzo último a compresión para concreto confinado (kg/cm²);

f'_c , esfuerzo último a compresión para concreto (kg/cm²);

k_a , factor de forma, igual a 1 debido a la forma circular en la sección transversal de los especímenes (ACI 440.2R-08).

Nivel efectivo de deformación de la fibra de carbono.

$$\varepsilon_{fe} = k_e \varepsilon_{fu} \quad (\text{ec. 3})$$

donde

ε_{fe} , nivel efectivo de deformación;

k_e , factor de eficiencia de tensión, la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008) recomienda utilizar 0.55;

ε_{fu} , fuerza de ruptura última de la fibra (cm/cm).

Fuerza de ruptura de la fibra de carbono.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (\text{ec. 4})$$

donde

ε_{fu} , diseño de la fuerza de ruptura de la fibra de carbono (kg/cm^2);

C_E , factor de reducción ambiental, se utilizaron dos valores; 0.95 y 0.85, debido a que se consideraron dos condiciones ambientales diferentes (ver Tabla 5.3), la fibra se colocó al exterior de una edificación y las pruebas se realizaron al interior del laboratorio;

ε_{fu}^* , deformación de ruptura última (cm/cm) (ver Tabla 5.2).

Fuerza de tensión última de la fibra.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (\text{ec. 5})$$

donde

f_{fu} , diseño de la fuerza de tensión última de la fibra de carbono (kg/cm^2);

C_E , factor de reducción ambiental,

f_{fu}^* , resistencia última a tensión reportada por el fabricante (kg/cm^2).

En la Tabla 5.3, se presentan los factores de reducción ambiental.

Tabla 5.3. Factores de reducción ambiental para varios sistemas FRP según la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008)

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción ambiental C_E
Exposición interior	Carbón	0.95
	Vidrio	0.75
	Aramida	0.85
Exposición exterior (puentes, muelles y estacionamientos)	Carbón	0.85
	Vidrio	0.65
	Aramida	0.75
Ambiente agresivo (plantas químicas y plantas de tratamiento de aguas residuales)	Carbón	0.85
	Vidrio	0.50
	Aramida	0.70

Se sustituyó la ecuación 2 en la ecuación 1 y el diámetro de la sección transversal del cilindro para obtener la ecuación 6, de esta, se despejó la resistencia última a compresión para concreto confinado (f'_{cc}), obteniendo así la ecuación 7.

$$n = \frac{f'_{cc} - f'_c}{3.3k_a} * D \quad (\text{ec. 6})$$

$$f'_{cc} = \frac{(3.3k_a)(\psi_f 2E_f t_f \varepsilon_{fe})(n)}{D} + f'_c \quad (\text{ec. 7})$$

Se observa que la última ecuación está en función del número de capas de fibra con las que fue forrado el cilindro, el tipo de reforzamiento (completo o parcial) y las condiciones de exposición de la fibra, así como valores constantes para todos los casos de reforzamientos ya descritos.

Para calcular la resistencia última de los especímenes se utilizó la ecuación 7, variando la cantidad de capas (1, 2 o 3) y el factor de reducción de la fuerza ($\psi_f = 0.85$ para refuerzo parcial y 0.95 para refuerzo completo). Las condiciones de exposición de la fibra y las propiedades de esta, se tomaron de la Tabla 5.1 y 5.2.

A continuación, a manera de ejemplo, se presenta el cálculo de la resistencia para el subgrupo 1B.

Se calcularon las propiedades de diseño de la fibra de carbono, utilizando las ecuaciones 4 y 5. Debido a las condiciones de exposición de la fibra al momento de su colocación (el refuerzo se colocó al exterior del laboratorio y las pruebas se realizaron al interior de este), se utilizaron dos factores de reducción ambiental.

Interior

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 0.95 * 6320 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 6004 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0.95 * 0.018 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} = 0.0171 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

Exterior

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 0.85 * 6320 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 5372 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0.85 * 0.018 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} = 0.0153 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

Para ambos casos se calculó el nivel efectivo de deformación con la ecuación 3.

Para interior

$$\varepsilon_{fe} = k_e \varepsilon_{fu} = 0.55 * 0.0171 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} = 0.009405 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

Para exterior

$$\varepsilon_{fe} = k_e \varepsilon_{fu} = 0.55 * 0.0153 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} = 0.008415 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

Para obtener la resistencia final del elemento, los datos obtenidos se sustituyeron en la ecuación 7. Se utilizó el valor de $n=1$ y un factor de reducción de la fuerza $\psi_f = 0.95$ debido a que el subgrupo 1B se reforzó con una capa de fibra de carbono en su totalidad.

Interior

$$f'_{cc} = \frac{(3.3 * 1) \left(0.95 * 2 * 387500 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 0.1 \text{ cm} * 0.009405 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \right) (1)}{15 \text{ cm}} + 386.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$f'_{cc} = 539.1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Exterior

$$f'_{cc} = \frac{(3.3 * 1) \left(0.95 * 2 * 387500 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * 0.1 \text{ cm} * 0.008415 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \right) (1)}{15 \text{ cm}} + 386.76 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$f'_{cc} = 523.1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

La resistencia obtenida del subgrupo 1B para refuerzo con una capa de fibra de carbono en interiores fue 539.1 kg/cm² y para en exteriores fue 523.1 kg/cm².

En la Tabla 5.4, se presentan las resistencias obtenidas para los subgrupos 1B, 2A, 2B y 3A, utilizando la metodología descrita.

Tabla 5.4. Resistencias teóricas calculadas según la norma ACI 440.2R-08. Condiciones interior y exterior

Refuerzo	Resistencia (en interior) [kg/cm ²]	Resistencia (en exterior) [kg/cm ²]
Una capa de fibra de carbono	539.1	523.1
Dos capas de fibra de carbono	691.5	659.4
Tres capas de fibra de carbono	843.8	795.7
Parcial con tres tiras de fibra de carbono	523.1	508.7

Para los cilindros con daño simulado (subgrupo 3B, grupo 4 y 5) no se realizaron los cálculos debido a que la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008) no contempla el uso de la fibra como método de rehabilitación para elementos dañados.

5.2. Análisis numérico y teórico de los resultados

En la Tabla 5.5, se presentan las resistencias obtenidas en las pruebas de compresión, así como las calculadas con la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008) para interiores y exteriores.

Tabla 5.5. Comparación de resistencias calculadas con la norma ACI 440.2R-08 y las obtenidas en la prueba de compresión axial

Refuerzo	Esfuerzo pruebas de compresión promedio [kg/ cm ²]	Esfuerzo teórico (interior) [kg/ cm ²]	Esfuerzo teórico (exterior) [kg/ cm ²]
Una capa de fibra de carbono	491.3	539.1	523.1
Dos capas de fibra de carbono	531.6	691.5	659.4
Tres capas de fibra de carbono	609.4	843.8	795.7
Tres tiras de fibra de carbono	389.4	523.1	508.7

Para analizar los resultados se calcularon errores relativos porcentuales respecto a los esfuerzos teóricos.

$$E_{RP} = \frac{|Valor\ teórico - Valor\ experimental|}{Valor\ teórico} * 100$$

donde

Valor teórico, esfuerzo teórico obtenido mediante la norma ACI 440.2R-08;

Valor experimental, esfuerzo obtenido de las pruebas de carga axial.

Se tomó como ejemplo el caso de una capa de fibra de carbono como refuerzo para interiores.

$$E_{RP} = \frac{|539.1 - 491.13|}{539.1} * 100 = 8.9\%$$

En la Tabla 5.6 se muestran todos los errores relativos porcentuales.

Tabla 5.6. Errores relativos porcentuales de los esfuerzos teóricos y experimentales

Refuerzo	Error relativo porcentual (interior)	Error relativo porcentual (exterior)
Una capa de fibra de carbono	8.9 %	6.1 %
Dos capas de fibra de carbono	23.1 %	19.4 %
Tres capas de fibra de carbono	27.8 %	23.4 %
Tres tiras de fibra de carbono	25.6 %	23.5 %

Al analizar los resultados de la Tabla 5.5, los esfuerzos calculados con la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008) son mayores cuando se coloca la fibra en interiores, mientras que, para exteriores, los resultados son semejantes a los esfuerzos obtenidos en las pruebas de compresión, esto se ve reflejado en los errores relativos de la Tabla 5.6, donde a mayor o menor cantidad de refuerzo se presentan mayores o menores porcentajes de error, debido al aumento o decremento de los esfuerzos.

Adicionalmente, como complemento del subcapítulo 4.3, se presentan las gráficas promedio de falla corregidas para todos los subgrupos, exceptuando el subgrupo 5B, debido a la falta de datos, provocado por una mala colocación de los aparatos (extensómetros radiales y axiales), por ello, no se calcularon para dichos casos.

. Así mismo, se comparan con la curva de capacidad promedio de los especímenes de control, donde el esfuerzo máximo registrado fue 386.8 kg/cm² y la deformación máxima 0.005 mm.

En la Figura 5.2 se presenta la gráfica promedio de falla corregida para el caso de los cilindros reforzados con una capa de fibra de carbono (RFC-1), en ella, el esfuerzo máximo obtenido fue 474 kg/cm², teniendo un aumento de la resistencia del 22.5% en comparación a los cilindros de control. De igual forma, la capacidad de deformación aumentó a 0.012 mm, siendo éste 2.4 veces más dúctil que el elemento sin refuerzo.

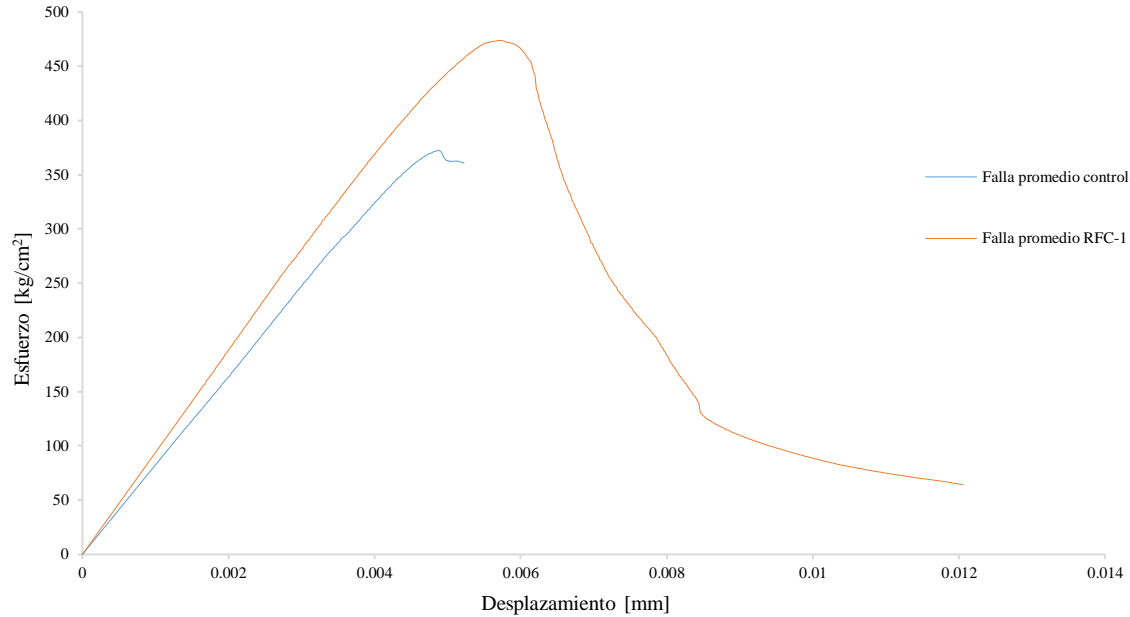


Figura 5.2. Análisis de resistencias entre en subgrupo CON y RFC-1

En la Figura 5.3 se presenta la gráfica promedio de falla corregida para el caso de los cilindros reforzados con dos capas de fibra de carbono (RFC-2). Para estos cilindros, el esfuerzo máximo obtenido fue 495 kg/cm^2 , adquiriendo 28% más resistencia que los especímenes de control. La capacidad de deformación aumentó a 0.017 mm , siendo éste 3.4 veces más dúctil.

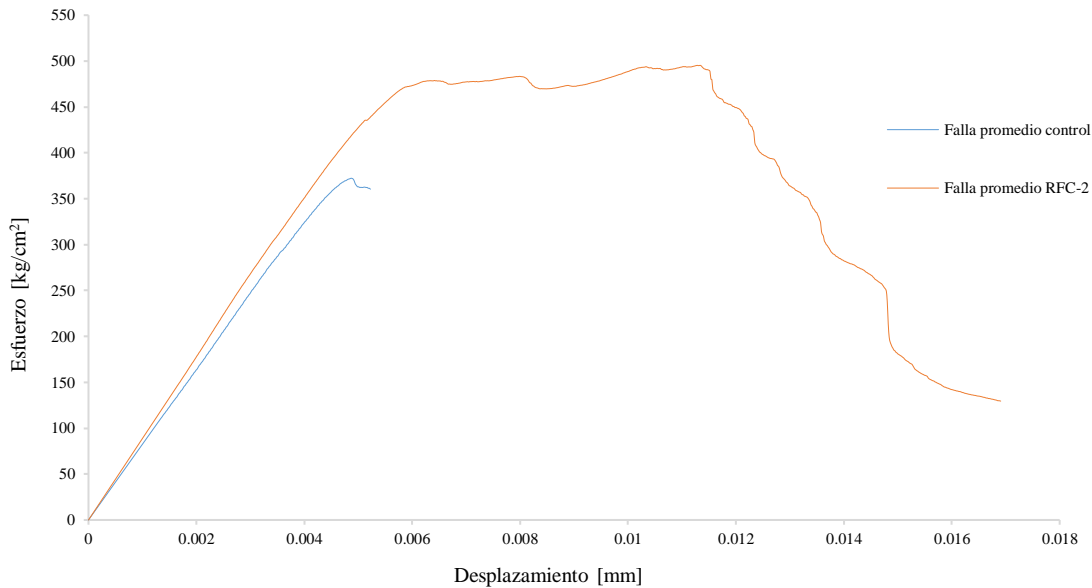


Figura 5.3. Análisis de resistencias entre en subgrupo CON y RFC-2

En la figura 5.4 se presenta la gráfica promedio de falla corregida para el caso de los cilindros reforzados con tres capas de fibra de carbono (RFC-3). Para este caso, se obtuvo un esfuerzo máximo de 556 kg/cm^2 , 43.7% más que el elemento sin refuerzo (control). La capacidad de deformación aumentó a 0.018 mm , 3.6 veces más dúctil que el elemento sin refuerzo.

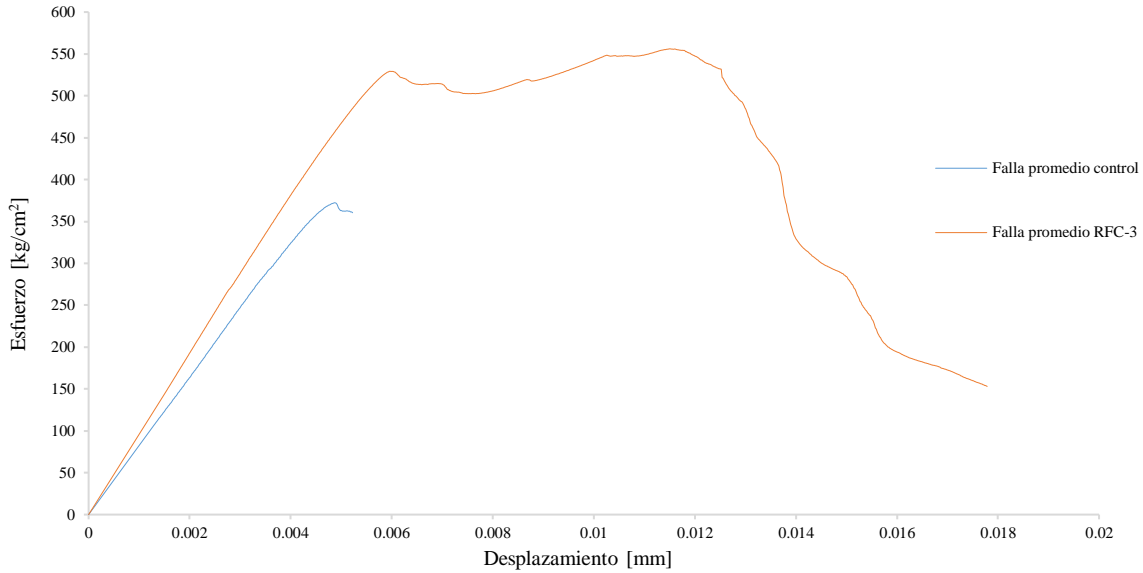


Figura 5.4. Análisis de resistencias entre en subgrupo CON y RFC-3

En la figura 5.5 se presenta la gráfica promedio de falla corregida para el caso de los cilindros reforzados con refuerzo parcial de fibra de carbono (RFC-P). Se encontró que, al utilizar esta condición de refuerzo, el elemento adquirió 0.6% más resistencia (389 kg/cm^2) en comparación con los cilindros sin refuerzo, sin embargo, la capacidad de deformación aumentó a 0.01 mm, por lo que, es dos veces más dúctil.

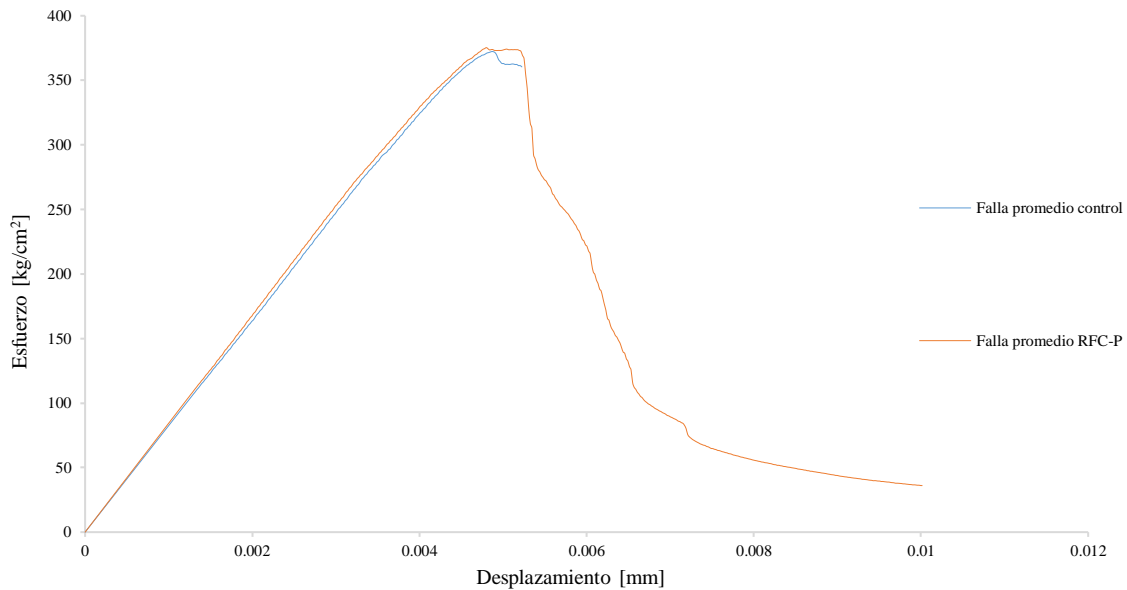


Figura 5.5. Análisis de resistencias entre en subgrupo CON y RFC-P

En la Figura 5.6, se presentan los demás casos analizados. Se observan menores resistencias en comparación a los cilindros de control, esto se puede atribuir a que los especímenes de los subgrupos, correspondientes a estos casos de análisis, presentaban daño mediante una grieta simulada; sin

embargo, al no recuperar el 100% la capacidad original de los cilindros, la fibra de carbono aportó mayor capacidad de deformación a los especímenes.

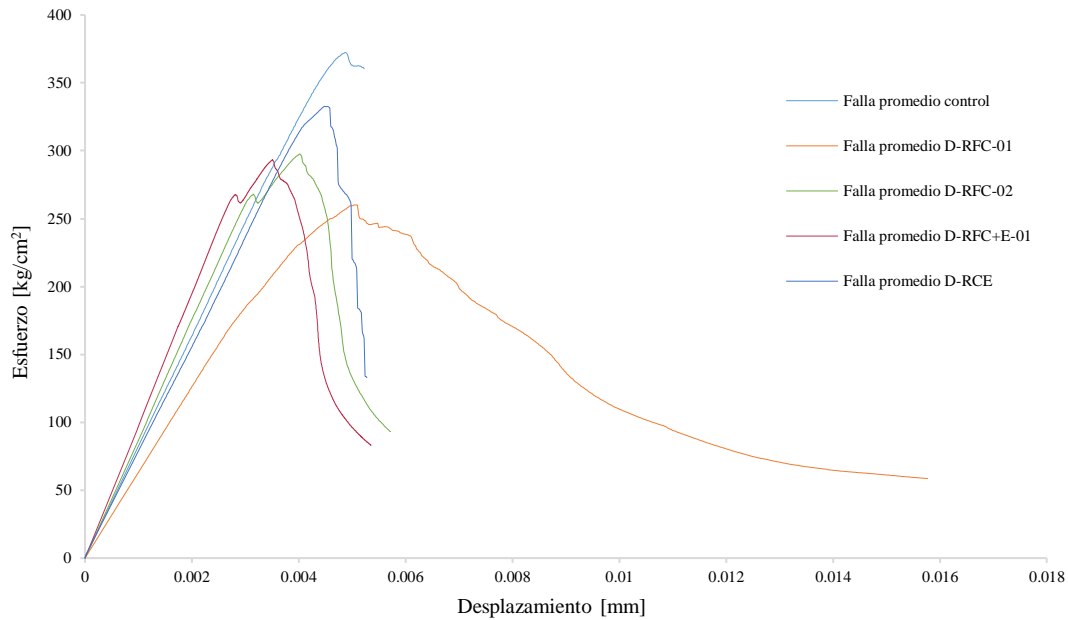


Figura 5.6. Análisis de resistencias entre en subgrupo CON y D-RFC-01, D-RFC-02, D-RFC+E-01 y D-RCE

En las curvas esfuerzo-deformación de las Figuras 5.2 a 5.6, la pendiente que indica el módulo de elasticidad disminuye o aumenta; por lo que, la rigidez axial es menor o mayor dependiendo del caso que se analice. Para algunos subgrupos, la resistencia incrementó en comparación a los elementos sin refuerzo, así mismo, para los elementos con daño simulado, la resistencia se mantuvo por debajo de la de los cilindros sin refuerzo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas de refuerzo y rehabilitación estructural son utilizados cuando se requiere rehabilitar o mejorar el comportamiento estructural de elementos y en general de todo un sistema estructural. Cada sistema cuenta con ventajas y desventajas que deben ser consideradas antes de su colocación. Entre estos sistemas se encuentra los polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC), que tienen como ventaja ser livianos, soportar grandes fuerzas a tensión y ayudar a confinar elementos dañados, y como desventaja su costo elevado y personal capacitado para su colocación.

Para estudiar el comportamiento del sistema PRFC como sistema de refuerzo y rehabilitación, se llevaron a cabo pruebas de compresión axial en 66 cilindros de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, divididos en 10 subgrupos, simulando en algunos de ellos daño mediante una grieta.

Como resultado de las pruebas de compresión, se obtuvieron curvas carga-deformación, resistencia máxima y módulo de elasticidad de cada espécimen ensayado. También se obtuvieron las resistencias teóricas de los cilindros reforzados con el sistema PRFC, éstas se obtuvieron de acuerdo con lo indicado en la norma ACI 440.2R-08 (ACI, 2008).

Con base en lo anterior se concluye lo siguiente:

- Al analizar los resultados, se observa que la fibra de carbono aportó mayor resistencia a los cilindros sin daño, aumentando la resistencia en función del número de capas de fibra de carbono utilizada como refuerzo, siendo tres capas el refuerzo en donde se obtuvo el mayor incremento a la resistencia. Sin embargo, al utilizar tiras de fibra de carbono como refuerzo parcial, el incremento en la resistencia del cilindro no fue significativo en comparación a los cilindros de control (sin refuerzo).
- En todos los casos analizados donde se reforzó con el sistema PRFC, este aportó mayor capacidad de deformación de los elementos, lo que se podría traducirse en estructuras más dúctiles.
- El aumento de resistencia y los módulos de elasticidad, para algunos casos, no fue significativo, debido a una deficiente colocación del sistema de reforzamiento.

Así mismo, se recomienda:

- Utilizar fibra de carbono en ambientes controlados (al interior de edificaciones) debido a que presenta mayor resistencia teórica a carga axial en comparación a la fibra expuesta al ambiente (colocación en exteriores de edificaciones).
- Personal capacitado y certificado para colocar el sistema de refuerzo de polímeros reforzados con fibras de carbono.

REFERENCIAS

ACI 440, (2008), “**ACI 440.2R-08, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**”, American Concrete Institute, Estados Unidos.

Bazán E. y Meli R., (1999), “**Diseño sísmico de edificios**”, Editorial Limusa, México.

Castillo R., (2010), “**Uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de elementos de concreto de puentes en Costa Rica**”, Programa de Ingeniería en Infraestructura del Transporte (PITRA), Costa Rica.

Cottier J., (2000), “**Fibras de carbón para el refuerzo de estructuras de concreto**”, Memorias Técnicas del XII Congreso Nacional de Ingeniería estructural, León, Guanajuato, noviembre, 2000.

Cuadros H. y Orozco H., (2007), “**Intervención de estructuras con refuerzos FRP**”. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda, Querétaro, Querétaro.

Sika AG, (2015), “**SikaWrap-301C, tejido de fibra de carbono de alta resistencia para reforzamiento de estructuras**”, SIKAG AG, México.

Sika AG, (2015), “**Sikadur-52, base epóxica para inyección y elaboración de morteros epóxicos**”, SIKAG AG, México.