



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
DE CAMINS, CANALS I PORTS DE BARCELONA



ESTUDIO EXPERIMENTAL
DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN
CONFINADO SOMETIDO A COMPRESIÓN

Tesis Doctoral de:
Carlos Aire Untiveros

Dirigida por:
Ravindra Gettu
Joan Ramon Casas Rius

Barcelona, Septiembre 2002

CAPÍTULO 5

HORMIGÓN CONFINADO CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA

5.1 INTRODUCCIÓN

Continuando con los objetivos planteados en el Capítulo 2, en el presente capítulo se estudia el comportamiento del hormigón confinado con polímeros reforzados con fibra (FRP). Para esto se ensayaron probetas cilíndricas de hormigón confinadas con FRP, siendo las variables experimentales la resistencia del hormigón sin confinar, el tipo de FRP y el nivel de confinamiento proporcionado por el número de capas de FRP. Se usaron dos tipos de FRP: de carbono y vidrio. Las capas de confinamiento variaron entre 1 y 12. Las resistencias características de los hormigones fueron de 25 y 60 MPa.

Los objetivos principales de este capítulo son caracterizar el comportamiento del hormigón sometido a confinamiento pasivo mediante ensayos de compresión axial de probetas cilíndricas de hormigón confinadas con FRP. Además, evaluar la influencia de la resistencia del hormigón sin confinar y el número de capas de confinamiento.

Para esto se presenta primeramente una revisión bibliográfica para establecer el estado actual de conocimientos del hormigón confinado con polímeros reforzados con fibra, enseguida el programa experimental de los ensayos realizados, presentación y análisis de los resultados, y las conclusiones particulares de este estudio.

5.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

El rápido deterioro de las estructuras de hormigón existentes está llegando a ser un problema importante que ha conducido al desarrollo de nuevos materiales de construcción. La mayoría de trabajos de rehabilitación consiste en reparar viejas estructuras deterioradas, estructuras dañadas por sismos y desastres naturales; y refuerzo de estructuras para soportar futuros sismos o para aumentar capacidad de carga. Los métodos de refuerzo tradicional, tales como, postensado externo y refuerzo con placas de acero, han sido un concepto de reparación en los últimos 20 años, sin embargo, frecuentemente tienen desventajas inherentes. La corrosión del acero y su elevado costo de manipulación y colocación constituyen las principales desventajas.

Los avances en la tecnología de los compuestos avanzados han conducido al desarrollo de los compuestos de polímero reforzado con fibra (FRP) que superan las propiedades de resistencia y fatiga del acero (ACI, 1996; Seible y Karbhari, 1996). Estos materiales han sido utilizados exitosamente en muchas industrias, tales como, aeroespacial, automotiva, construcción naval, entre otros. Sin embargo, la comunidad de ingeniería civil sólo recién ha comenzado a reconocer sus ventajas, lo que se evidencia por el gran número de publicaciones y el creciente número de conferencias sobre el tema (Neale y Laboussière, 1992; Nanni et al., 1996) y por los esfuerzos que están dedicando al desarrollo de normas en muchos países.

En la actualidad, varios tipos de materiales FRP son considerados para reparar o reajustar estructuras de hormigón, entre los cuales figuran los polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP), polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) y polímeros reforzados con fibra de aramida (AFRP).

Los FRP pueden usarse para confinar columnas de hormigón resultando en un incremento en la resistencia a compresión y ductilidad (Katsumata et al., 1987; Priestley et al., 1992; Saadatmanesh y Ehsani, 1994; Larralde, 1997; Mirmiran y Shahawy, 1997; Karbhari y Gao, 1997; Di Tomasso y Ghinelli, 1998; Toutanji, 1999; Saafi et al., 1999; Xiao y Wu 2000), así como para un mejoramiento en la durabilidad sobre los materiales convencionales. Su uso como refuerzo en estructuras de hormigón, tales como, columnas, ha ganado popularidad en Europa, Japón y EE.UU. (Katsumata y Kimura, 1990; Kasei, 1993; Picher et al., 1996).

Asimismo, debido a su alta relación resistencia-peso y rigidez-peso, resistencia a corrosión, resistencia a la degradación ambiental y adaptabilidad, presenta una opción atractiva como estrategia de refuerzo alternativo y extremadamente eficiente, en casos del uso del FRP de carbono, como inicialmente se demostró en Japón (Katsumata et al., 1988; Katsumata y Kimura, 1990; Hasegawa et al., 1992).

El método ha sido desde entonces experimentalmente estudiado usando una variedad de tipos de fibras y técnicas de fabricación, para aplicaciones como redimensionamiento sísmico y

reparación de elementos estructurales degradados o deteriorados (Fardis y Khalili, 1981, 1982; Priestley et al., 1992; Karbhari y Eckel, 1994; Harmon y Slattery, 1992; Watson 1994; Saadatmanesh et al., 1996; Seible y Karbhari, 1996).

En elementos bajo compresión axial, se ha utilizado la acción del confinamiento del encamisado por FRP mediante la restricción pasiva de la dilatación del hormigón para aumentar la capacidad de carga y deformación. El encamisado de FRP aplicado externamente coloca al hormigón bajo un estado de compresión hidrostático o triaxial, el cual incrementa la resistencia.

Se ha realizado mucha investigación teórica y experimental sobre la resistencia y deformación longitudinal en rotura del hormigón confinado por presión hidrostática (ver Capítulo 3). Sin embargo, en la mayoría de los casos, la aplicabilidad de las expresiones propuestas, basadas en el refuerzo de acero lateral, a los compuestos FRP es limitada debido a la inherente anisotropía en el encamisado, resultando generalmente pobre la comparación entre los resultados experimentales y las predicciones, especialmente los relacionados a la respuesta de deformación (Karbhari y Gao, 1997) y en muchos casos sobrestima las resistencias conduciendo a un diseño inseguro (Mirmiran y Shahawy, 1997).

Diversos sistemas de encamisado han sido desarrollados y validados en condiciones de laboratorio y campo (Matsuda et al., 1990; Priestley y Seible, 1991; Seible y Priestley, 1993; Xiao et al., 1996; Xiao y Ma, 1997). Así por ejemplo, en EE.UU. se han empleado en pilares de puentes, muros, vigas y losas (Nanni y Gold, 1998; Karbhari y Seible, 1999); en Canadá en pilares de edificios y puentes, y vigas (Neale y Labossière, 1998; Rizkalla y Labossière, 1999); en Japón en losas de puente, túneles, refinerías de petróleo, edificios, chimeneas, estructuras marinas, muros de contención y cimentaciones (Nanni, 1995; Emmons et al., 1998; Shehata et al., 1998; Fukujama, 1999); y en Europa en edificios residenciales, pilares de puentes y viaductos en carreteras; y vigas de puentes de carreteras (Nanni, 1997; Burgoyne, 1999; Taerwe y Matthys, 1999), entre otros.

A pesar de las aplicaciones exitosas de los sistemas de encamisado FRP en modelos de laboratorio, prototipos y aplicaciones in situ, la investigación sobre el mecanismo de interacción entre el encamisado FRP y el hormigón confinado es aún limitada (Picher et al., 1996; Hosotani et al., 1996; Mirmiran y Shahawy, 1997).

Por otro lado, dada la extensión del uso de los FRP en EE.UU., Europa y Japón, el Comité ACI 440 F está desarrollando un documento (ACI, 1999) que trata de las recomendaciones de diseño y técnicas de construcción para el uso de FRP como refuerzo de hormigón (ACI Committee 440, 1999).

La revisión bibliográfica permite establecer que se han realizado estudios sobre hormigón confinado con fibras de carbono y vidrio en probetas cilíndricas de 50 × 100 mm (Harmon et

al., 1995; Harmon et al., 1998); 75 × 152 mm (Larralde, 1997); 76 × 305 mm (Toutanji, 1999); 100 × 200 mm (Miyachi et al., 1997); 150 × 300 mm (Nanni et al., 1994; Picher et al., 1996; Mirmiran y Shahawy, 1997; Di Tomasso y Ghinelli, 1998; Xiao y Wu, 2000); y 152.4 × 435 mm (Saafi et al., 1999).

En la mayoría de los casos, las resistencias de los hormigones estudiados oscilan entre 15 y 50 MPa (Toutanji, 1999; Picher et al., 1996; Nanni et al., 1994; Miyachi et al., 1997; Mirmiran y Shahawy, 1997; Larralde, 1997; Di Tomasso y Ghinelli, 1998; Saafi et al., 1999; Xiao y Wu, 2000) y las probetas fueron confinadas con 2 y/o 3 capas de fibra de carbono y/o vidrio. Además, existe información de probetas de hormigón confinadas con fibra de vidrio con hasta 14 capas (Mirmiran y Shahawy, 1997). La mayoría de estos estudios se hicieron en probetas de 150 × 300 mm (Picher et al., 1996; Nanni et al., 1994; Mirmiran y Shahawy, 1997; Di Tomasso y Ghinelli, 1998; Xiao y Wu, 2000).

Existe además información experimental de probetas de hormigón confinadas con fibra de vidrio y carbono, en hormigones de alta resistencia del orden de los 60 MPa (Harmon et al., 1995; Harmon et al., 1998) pero en probetas de 50 × 100 mm.

Por otro lado, existen modelos analíticos que confirman el incremento en resistencia y ductilidad de probetas cilíndricas de hormigón cuando son confinadas con FRP (Fardis y Khalili, 1982; Chai et al., 1991; Karbhari y Eckel, 1993; Cusson y Paultre, 1995; Miyachi et al., 1997; Mirmiran, 1996; Larralde, 1997; Karbhari y Gao, 1997; Saafi et al., 1999). El análisis de estos resultados permite establecer que existe un comportamiento diferente del confinamiento en hormigones de baja y alta resistencia, siendo más notable el efecto de confinamiento en los de baja resistencia. Varios investigadores han empleado algunas de las expresiones propuestas en la literatura con variado éxito, sin embargo, coinciden en encontrar tendencias similares.

Es evidente el incremento de investigaciones en esta área. Sin embargo, la información es limitada en cuanto a niveles de resistencia y tamaño de probetas. En este sentido, la presente investigación pretende complementar la información existente y evaluar el comportamiento del hormigón confinado con FRP bajo las condiciones del presente trabajo.

5.3 CARACTERIZACIÓN DEL FRP

Se determinaron las propiedades del compuesto FRP-epoxy bajo tracción uniaxial. Los ensayos fueron realizados de acuerdo con la ASTM D3039 (1995). Las muestras de ensayo fueron fabricadas individualmente para evitar efectos de borde y corte, con dimensiones de 250 mm de largo y 25 mm de ancho. Se siguió el mismo procedimiento de aplicación del epoxy que en el caso del confinamiento de las probetas. Se prepararon dos tipos de muestras: una en el sentido de la dirección del confinamiento y la otra en sentido transversal. Cabe

recordar que los FRP de carbono tienen fibras unidireccionales, mientras que los FRP de vidrio tienen un refuerzo bidireccional (GAR 90/10). La Figura 5.1 muestra un detalle del ensayo a tracción de los FRP. Los resultados se presentan en la Tabla 5.1 y corresponden al promedio de 4 muestras en el caso del ensayo en dirección del confinamiento y 3 muestras en el caso del ensayo en dirección transversal al confinamiento.



Figura 5.1 Ensayo de tracción de los FRP

Tabla 5.1 Propiedades de los FRP obtenidos experimentalmente y datos del fabricante

Parámetro	Tipo de FRP	
	Carbono	Vidrio
Datos proporcionados por el fabricante (dirección del confinamiento)		
Carga unitaria máxima, f_{fr}	456 N/mm/capa	447 N/mm/capa
Rigidez del compuesto, E_{fs}	28 kN/mm/capa	9.7 kN/mm/capa
Datos determinados experimentalmente		
Ensayo: Dirección del confinamiento		
Carga unitaria máxima, f_{fr}	330.5 N/mm/capa ($\pm 3.5\%$)	238.8 N/mm/capa ($\pm 3.8\%$)
Rigidez del compuesto, E_{fs}	23.9 kN/mm/capa ($\pm 1.8\%$)	12.3 kN/mm/capa ($\pm 3\%$)
Ensayo: Dirección transversal al confinamiento		
Carga unitaria máxima, f_{fr}	7.97 N/mm/capa ($\pm 7.43\%$)	27.15 N/mm/capa ($\pm 5.2\%$)
Rigidez del compuesto, E_{fs}	3.4 kN/mm/capa ($\pm 10\%$)	2.2 kN/mm/capa ($\pm 10.3\%$)

Como se observa en la tabla, la carga y rigidez están en unidades de fuerza por dimensión unitaria perpendicular a la dirección principal de las fibras por capa (es decir, N/mm/capa). Estas unidades permiten cuantificar el confinamiento sin tener que considerar el espesor final del compuesto. Por otro lado existen diferencias entre los valores reportados por el fabricante

y los determinados experimentalmente. Para este estudio se emplearán los resultados obtenidos experimentalmente. Como era de esperarse los valores encontrados son mayores en la dirección del confinamiento o dirección principal del refuerzo. Estos resultados serán tomados como base para el cálculo de las tensiones de confinamiento.

5.4 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS SOBRE EL HORMIGÓN

5.4.1 Programa de ensayos

Se ensayaron probetas cilíndricas de hormigón de 150 × 300 mm confinados con diferentes número de capas de FRP de carbono y vidrio. Las resistencias características de los hormigones sin confinar fueron de 25 y 60 MPa. En cada caso se ensayaron 3 probetas. Las probetas corresponden a las fabricadas en la segunda etapa (Tabla 2.3, Capítulo 2). La Tabla 5.2 presenta en detalle, el alcance del programa de ensayos. Todas las configuraciones de ensayo fueron a compresión axial y el control fue por desplazamiento del pistón a una velocidad de 0.005 mm/seg. En el caso del hormigón confinado la carga fue aplicada únicamente sobre la superficie de hormigón.

Tabla 5.2 Ensayos de confinamiento con FRP: Programa de ensayos

Serie	Tipo de fibra	Número de capas	Espesor de confinamiento nominal mm
HF30	Ninguno	0	0
	Carbono	1	0.117
		3	0.351
		6	0.702
	Vidrio	1	0.149
		3	0.447
6		0.894	
HF70	Ninguno	0	0
	Carbono	1	0.117
		3	0.351
		6	0.702
		9	1.053
		12	1.404
	Vidrio	1	0.149
		3	0.447
		6	0.894
		9	1.341
		12	1.788

5.4.2 Ensayo de hormigón sin confinar

Los cilindros fueron ensayados por control de desplazamiento circunferencial, para lo cual se colocó una cadena con extensómetro circunferencial en el centro de la probeta (Figura 2.3, Capítulo 2). El procedimiento de aplicación de carga y obtención de las curvas tensión-deformación se presentan en el Capítulo 3 (Sección 3.3.2).

5.4.3 Ensayo de hormigón confinado con FRP

Los ensayos fueron realizados por control de desplazamiento del pistón de la MTS (Ver Figura 2.6, Capítulo 2). A continuación se detalla algunos aspectos del confinamiento de las probetas.

Las probetas de ensayo fueron confinadas mediante zunchado. Se usaron dos tipos de compuestos, los cuales son adheridos al hormigón mediante un sistema epoxy. El sistema epoxy consiste de dos partes: resina y endurecedor. El sistema epoxy fue mezclado durante 3 minutos mediante un taladro acondicionado con un agitador. Las probetas de hormigón fueron limpiadas e impregnadas con un imprimante previo a la colocación del epoxy, con el fin de sellar los poros y permitir una buena adherencia de la fibra. Se aplicó una capa muy fina a la fibra previamente colocado sobre una superficie lisa y plana, y luego se aplicó directamente sobre la superficie de la probeta de hormigón. Se debe tener especial cuidado en asegurar que no existan vacíos entre la fibra y la probeta de hormigón, para lo cual la aplicación del FRP impregnado de resina se hace con ayuda de un rodillo de ranuras. Después de la aplicación de la primera capa de FRP se aplica una segunda capa de epoxy para permitir la aplicación de la segunda y sucesivas capas de FRP. Finalmente, se aplica una última capa de epoxy sobre la superficie de la probeta de hormigón zunchada. En todos los casos los traslapes fueron de 150 mm y las capas de FRP, fueron colocadas diametralmente opuestas con respecto a la anterior. La Figura 5.2 muestra un procedimiento típico del zunchado de una probeta de hormigón.

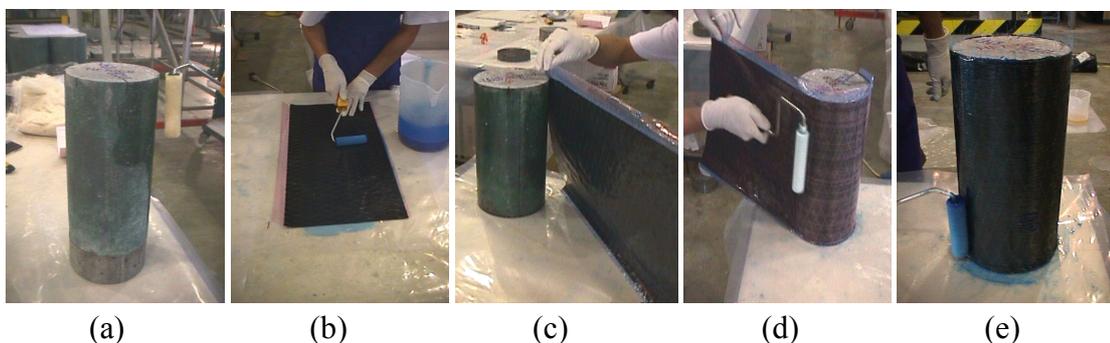


Figura 5.2 Procedimiento típico de zunchado: (a) Imprimación, (b) Aplicación de sistema epoxy sobre la capa de FRP, (c) Colocación de la primera capa de zunchado, (d) Zunchado con ayuda del rodillo de ranura, (e) Aplicación de última capa del sistema epoxy.

La puesta en marcha del ensayo consiste en colocar la probeta, la cual está instrumentada con galgas extensométricas, sobre la prensa. Los ensayos se realizaron aplicando carga únicamente sobre la sección de hormigón. Para esto se colocaron dos placas circulares de acero, de 150 mm de diámetro y 45 mm de espesor, una en la parte superior y la otra en la parte inferior de la probeta, lo que garantiza que la carga sea aplicada sobre la superficie de hormigón. Para minimizar el efecto de la fricción entre las placas de acero y el hormigón, se colocó en la interface una combinación de teflón/grasa/teflón (utilizando láminas de teflón de 0.1 mm). Posteriormente, se colocan los transductores de desplazamiento tipo LVDT. La Figura 2.6 (Capítulo 2) presenta la disposición de la probeta lista para el ensayo a compresión. Durante los primeros ensayos de las probetas de alta resistencia confinada con FRP de carbono, se observó que la rotura era explosiva, lo cual dañó los LVDTs, por lo que se decidió descartar este tipo de instrumentación para la totalidad de las probetas de alta resistencia.

La realización del ensayo consiste en lo siguiente: puesto en marcha la prensa, se aplica una pequeña carga axial (del orden de 15 a 20 kN) sobre la probeta. Esto asegura el contacto con las placas de acero y sensibiliza los instrumentos de medición. Enseguida se aplica la carga, a la velocidad previamente establecida. El ensayo finaliza cuando se presenta la rotura o cuando los LVDTs alcanzan su capacidad máxima de desplazamiento.

El programa de adquisición de datos registra, durante todo el ensayo, los valores de carga y los desplazamientos medidos a través de las galgas extensométricas y los LVDTs.

El proceso de obtención de las curvas tensión-deformación es como sigue: la tensión se calcula dividiendo la carga obtenida por el área de la sección transversal de la probeta de hormigón confinada con el FRP. La deformación axial de la sección de hormigón se calcula mediante el registro de los desplazamientos totales entre los platos a través de los LVDTs y las deformaciones transversales y longitudinales en el FRP mediante las galgas extensométricas pegadas sobre la superficie externa de la probeta. Los datos de desplazamiento axial registrados por los LVDTs se transforman en deformaciones unitarias dividiéndolos por la altura de la probeta.

Se dibuja las curvas tensión-deformación con los resultados obtenidos de los LVDTs y las galgas extensométricas. En ambos casos se sigue el mismo procedimiento explicado en la Sección 3.3.2 del Capítulo 3, correspondiente a la corrección por la no linealidad inicial de las curvas tensión-deformación. Cabe mencionar que no fue posible instrumentar con LVDTs la totalidad de las probetas debido a la característica explosiva del modo de rotura, especialmente en los hormigones de alta resistencia confinadas con FRP de carbono.

5.5 RESULTADOS

5.5.1 Comportamiento en compresión uniaxial

Bajo compresión uniaxial, el modo de rotura de los hormigones de baja (HF30) y alta resistencia (HF70) ocurrió por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga, como se muestra en el esquema de la Figura 5.3. Estos modos de rotura son bastante similares a aquellos hormigones sin confinar de la fase de investigación previa (Ver Sección 3.4.1, Capítulo 3). El Anexo G presenta un registro fotográfico del aspecto de las probetas después de los ensayos.

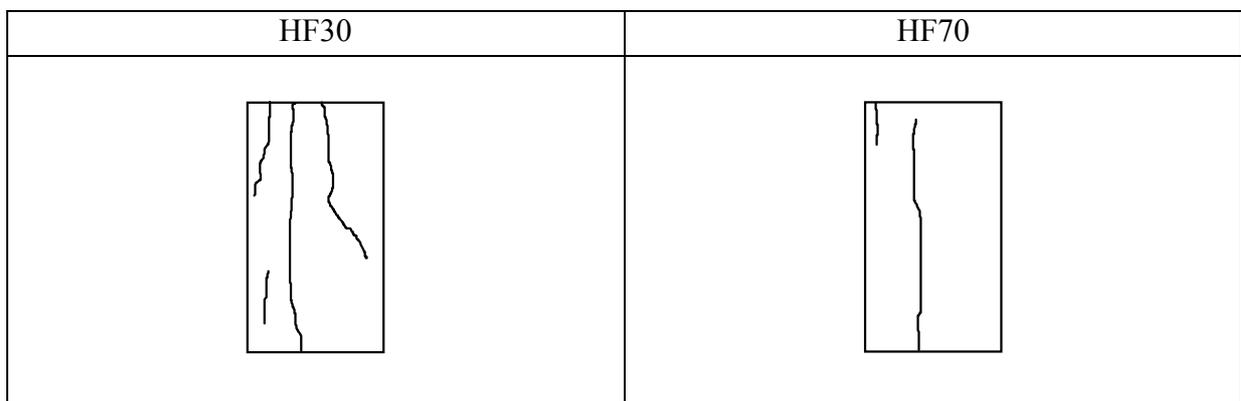


Figura 5.3 Modos de rotura de los hormigones estudiados

La Figura 5.4 muestra el comportamiento tensión-deformación axial de los hormigones de baja (HF30) y alta resistencia (HF70) ensayados a compresión uniaxial. Las curvas que se presentan en la Figura 5.4 corresponden a las curvas típicas de los materiales. Como se aprecia en la figura, la pendiente del brazo descendente (régimen post-pico) es más pronunciada en el hormigón de alta resistencia. Esto indica mayor fragilidad y menor ductilidad en el hormigón de alta resistencia (HF70). El Anexo G presenta las curvas tensión-deformación axial de todas las probetas ensayadas.

La Tabla 5.3 presenta las propiedades mecánicas de los hormigones estudiados bajo condiciones de carga axial. En esta tabla f'_c es la tensión máxima, E_c es el módulo de elasticidad en compresión; ϵ_c es la deformación correspondiente a la tensión máxima y μ es el coeficiente de Poisson. Los resultados presentados corresponden al promedio de tres ensayos. El Anexo G presenta los resultados de todas las probetas ensayadas.

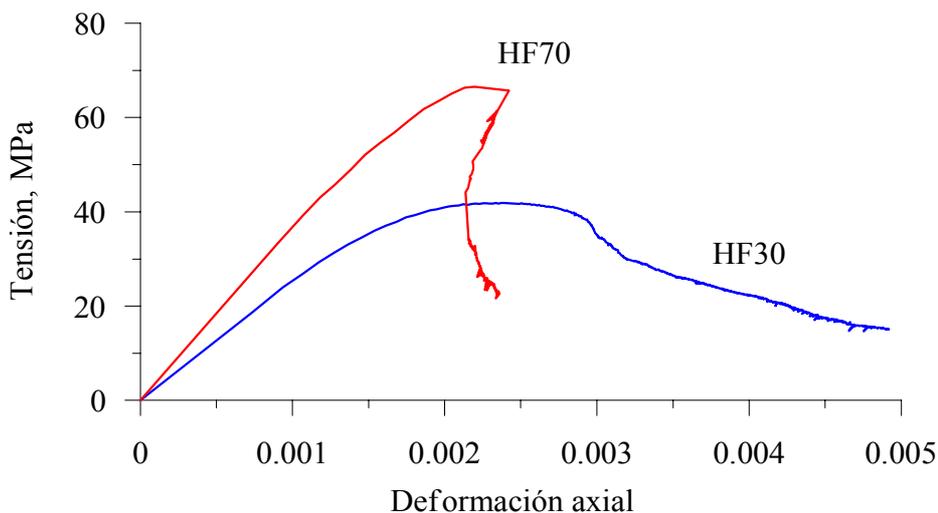


Figura 5.4 Comportamiento tensión-deformación axial de los hormigones estudiados

Tabla 5.3 Propiedades mecánicas de los hormigones estudiados

Propiedad	Tipo de hormigón	
	HF30	HF70
f_c , MPa	42 ±2%	69 ±5%
E_c , GPa	25 ± 6%	35 ±6%
ϵ_c , $\mu\epsilon$	2390 ±3%	2400*
μ	0.20 ±3%	0.24 ±11%

* Un solo valor

5.5.2 Comportamiento en compresión uniaxial del hormigón confinado con FRP

El modo de fallo está gobernada por la rotura del FRP. La Tabla 5.4 presenta su caracterización, así como su localización, mientras que las Figuras 5.5 y 5.6 muestran los esquemas de los modos de rotura de las probetas ensayadas. En general, la línea de rotura fue perpendicular a la fibra. Se observó en los ensayos que la rotura de los FRP de vidrio es menos repentina y explosiva que la del FRP de carbono. En ambos casos, la rotura fue predecible debido a los sonidos originados por el estallamiento inicial de las fibras indicando el inicio del agrietamiento del FRP. Otra característica del modo de rotura de las probetas es que hubo una capa fina de hormigón o mortero adherida al FRP, lo que indica que la adherencia entre el hormigón y el FRP fue satisfactoria. Por otro lado, en todos los casos la rotura del FRP se presentó lejos de la zona de traslape entre capas de FRP. A continuación se comenta más particularidades del modo de rotura observado.

Los hormigones confinados con FRP de vidrio presentaron una rotura moderadamente repentina y explosiva, con presencia de desprendimiento del FRP. En el caso del hormigón de

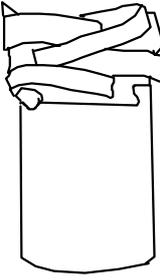
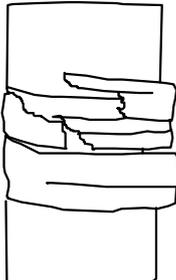
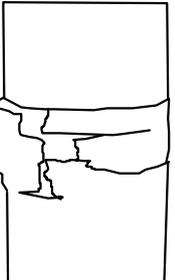
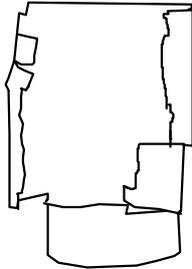
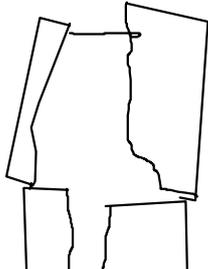
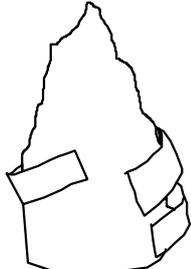
alta resistencia HF70, el área de rotura es mayor que en el caso del hormigón de baja resistencia HF30, como se observa en la Figura 5.5. Aún cuando hubo desintegración del hormigón en la zona de rotura, las probetas permanecieron relativamente integras al final de los ensayos.

Sin embargo, para los hormigones confinados con FRP de carbono, el modo de rotura fue repentino y explosivo, como se muestra en la Figura 5.5. En este caso, además de la ruptura del FRP, el hormigón se rompió en pedazos de forma cónica. En el caso del hormigón de alta resistencia HF70, el modo de rotura fue aún más catastrófico, acompañado por una gran explosión, y en la mayoría de los casos, las probetas quedaron completamente destruidas.

El Anexo H presenta los esquemas de los modos de rotura de las probetas ensayadas. Estos esquemas incluyen las fisuras presentadas en los FRP y una vista de la cara superior de la probeta después del ensayo.

Tabla 5.4 Caracterización y ubicación de la rotura de la probeta y del FRP

<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio</i>	
1 capa	Rotura en el tercio superior (hormigón desintegrado). Delaminación del FRP.
3 capas	Rotura en el centro (hormigón desintegrado). Delaminación del FRP.
6 capas	Rotura al centro y 1/3 superior (hormigón desintegrado). FRP delaminado.
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de carbono</i>	
1 capa	Rotura explosiva. Ruptura del FRP en 2/3 partes de la altura de la probeta.
3 capas	Rotura explosiva. Ruptura del FRP en toda la altura de la probeta.
6 capas	Rotura explosiva y total. Rotura de la probeta en forma de cono.
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio</i>	
1 capa	Rotura diagonal del FRP.
3 capas	Rotura inferior y en 2/3 partes de la altura de la probeta. FRP delaminado.
6 capas	Rotura superior (hormigón desintegrado). Delaminación del FRP.
9 capas	Rotura al centro y 1/3 superior (hormigón desintegrado). FRP delaminado.
12 capas	Rotura al centro y 2/3 de la altura (hormigón desintegrado). FRP delaminado
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de carbono</i>	
1 capa	Rotura explosiva. Ruptura del FRP en toda la altura de la probeta.
3 capas	Rotura explosiva y total. Rotura de la probeta en forma de cono.
6, 9 y 12 capas	Rotura explosiva y total. Rotura de la probeta en forma de cono.

<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio</i>			
1 capa	3 capas	6 capas	Observaciones
 <p>HFV30-1-1</p>	 <p>HFV30-3-2</p>	 <p>HFV30-6-1</p>	<p>Rotura repentina y explosiva (leve). Rotura perpendicular a la fibra. Presencia de macrogrietas. La probeta permanece relativamente integra después del ensayo.</p>
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de carbono</i>			
1 capa	3 capas	6 capas	Observaciones
 <p>HFC30-1-1</p>	 <p>HFC30-3-1</p>	 <p>HFC30-6-1</p>	<p>Rotura repentina y explosiva (severa). Rotura del FRP a todo lo largo de la probeta.</p>

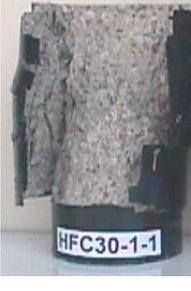
<i>Comparación del modo de rotura de las probetas confinadas con FRP</i>			
FRP Vidrio		FRP carbono	
1 capa	6 capas	1 capa	6 capas
		Explosiva	Muy explosiva
 <p>HFV30-1-2</p>	 <p>HFV30-6-1</p>	 <p>HFC30-1-1</p>	 <p>HFC30-6-1</p>

Figura 5.5.a Esquemas del modo de rotura de los hormigones confinados con FRP

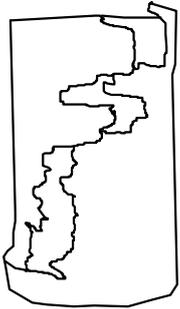
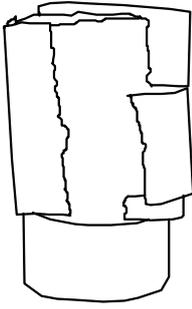
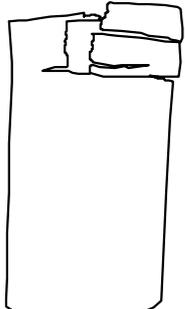
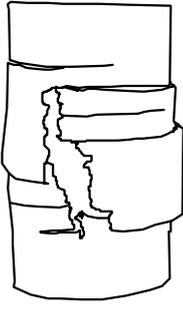
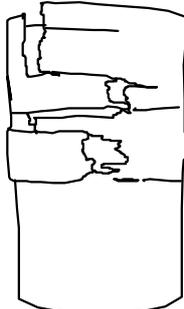
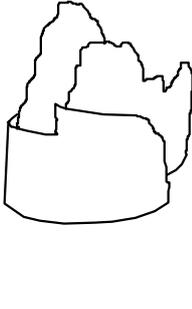
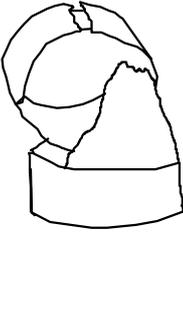
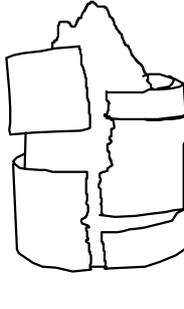
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
				
HFV70-1-2	HFV70-3-2	HFV70-6-2	HFV70-9-2	HFV70-12-3
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de carbono</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
				
HFC70-1-2	HFC70-3-3	HFC70-6-2	HFC70-9-1	HFC70-12-2
<i>Comparación del modo de rotura de las probetas confinadas con FRP</i>				
FRP Vidrio		FRP carbono		
1 capa	12 capas	1 capa	12 capas	
			Muy explosiva	
HFV70-1-2	HFV70-12-3	HFC70-1-2	 HFC70-12-2	

Figura 5.5.b Esquemas del modo de rotura de los hormigones confinados con FRP

La Figura 5.6 muestra en detalle la forma de rotura típica del extremo superior de las probetas ensayadas. Es notorio el colapso total del extremo superior de las probetas cuando el hormigón es confinado con FRP de carbono. Esto se debe al carácter explosivo de la rotura. En el caso del hormigón H30 confinado con 3 y 6 capas de FRP de vidrio, la cara superior no presentó fisuración debido a que la rotura se produjo al centro de la probeta. En los demás casos, se observa una desintegración parcial o total del extremo superior de la probeta, dependiendo de la localización de la rotura.

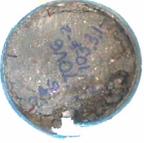
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio</i>				
1 capa	3 capas	6 capas		
				
HFV30-1-1	HFV30-3-2	HFV30-6-1		
<i>Hormigón HF30 confinado con FRP de carbono</i>				
1 capa	3 capas	6 capas		
		Rotura total		
HFC30-1-1	HFC30-3-1			
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
				
HFV70-1-2	HFV70-3-2	HFV70-6-2	HFV70-9-1	HFV70-12-3
<i>Hormigón HF70 confinado con FRP de carbono</i>				
1 capa	3 capas	6 capas	9 capas	12 capas
	Rotura total	Rotura total	Rotura total	Rotura total
HFC70-1-2				

Figura 5.6 Esquemas del modo de rotura del extremo superior de las probetas

Las Figuras 5.7 a 5.10 muestran el comportamiento tensión-deformación, donde los valores positivos corresponden a las deformaciones axiales, mientras que los valores negativos son las deformaciones transversales.

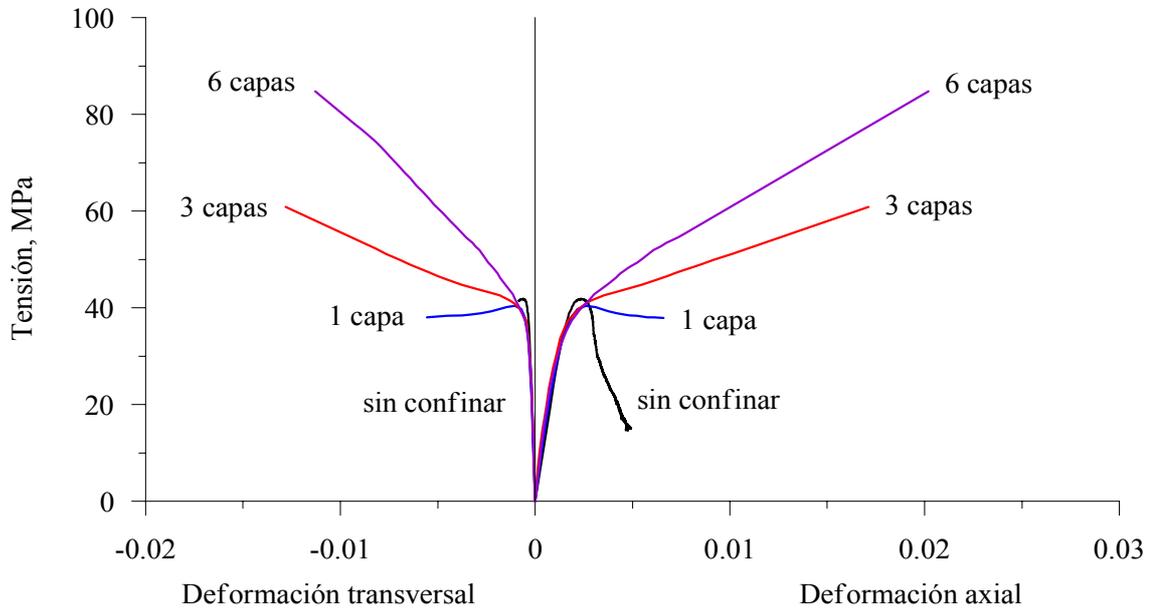


Figura 5.7 Curvas tensión-deformación del HF30 confinadas con FRP de vidrio

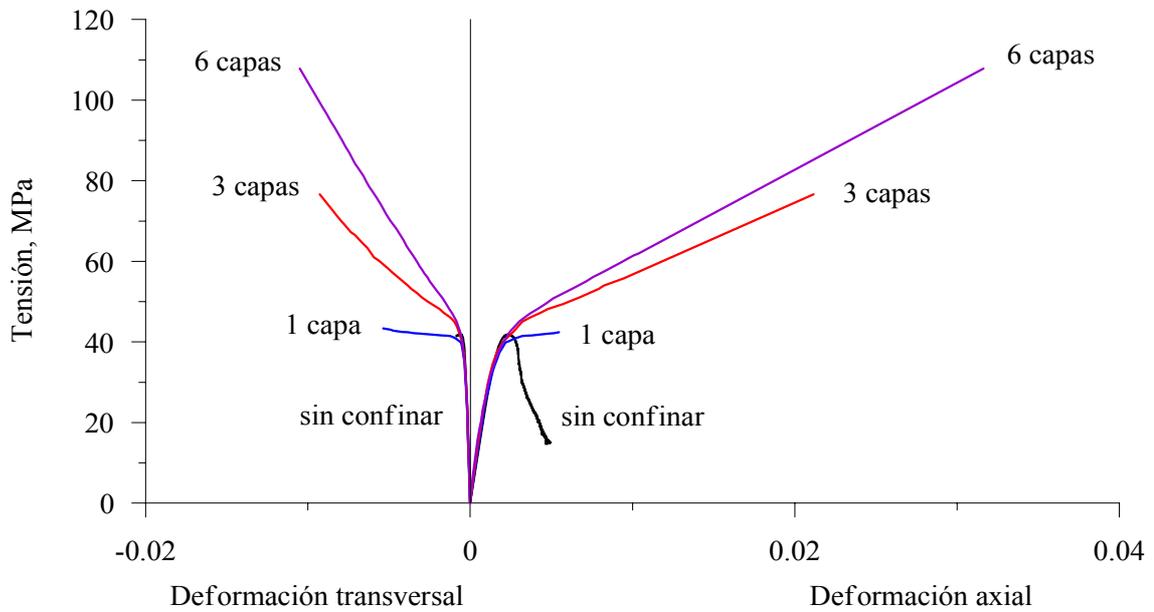


Figura 5.8 Curvas tensión-deformación del HF30 confinadas con FRP de carbono

Las curvas corresponden al promedio de tres ensayos, excepto en los casos que se indica en la Tabla 5.5. El Anexo I presenta las curvas tensión-deformación axial de todas las probetas ensayadas.

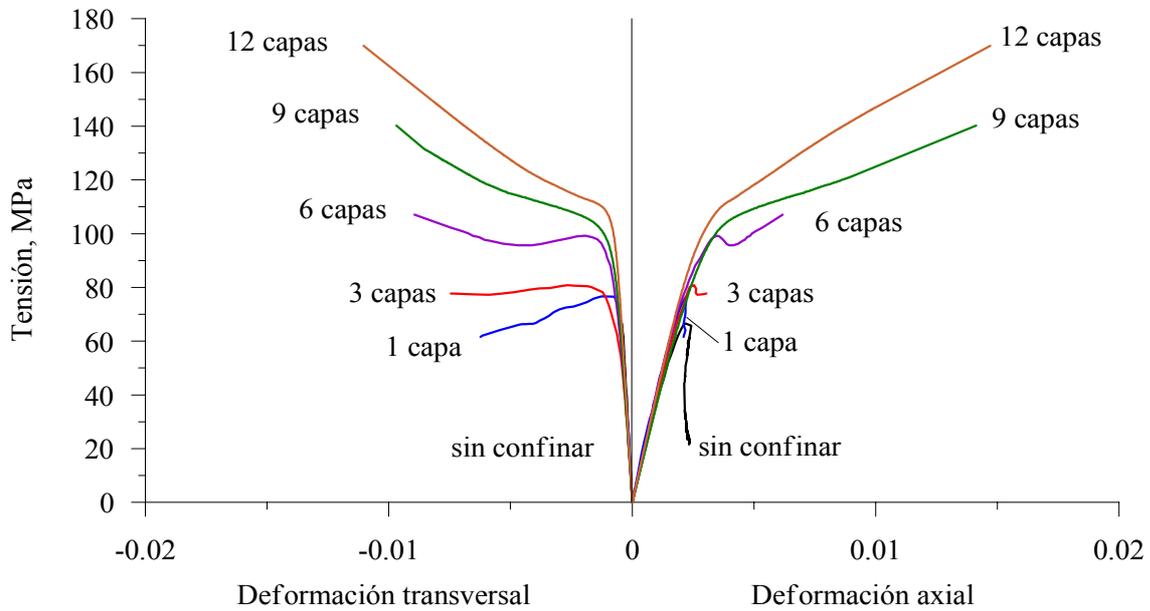


Figura 5.9 Curvas tensión-deformación del HF70 confinadas con FRP de vidrio

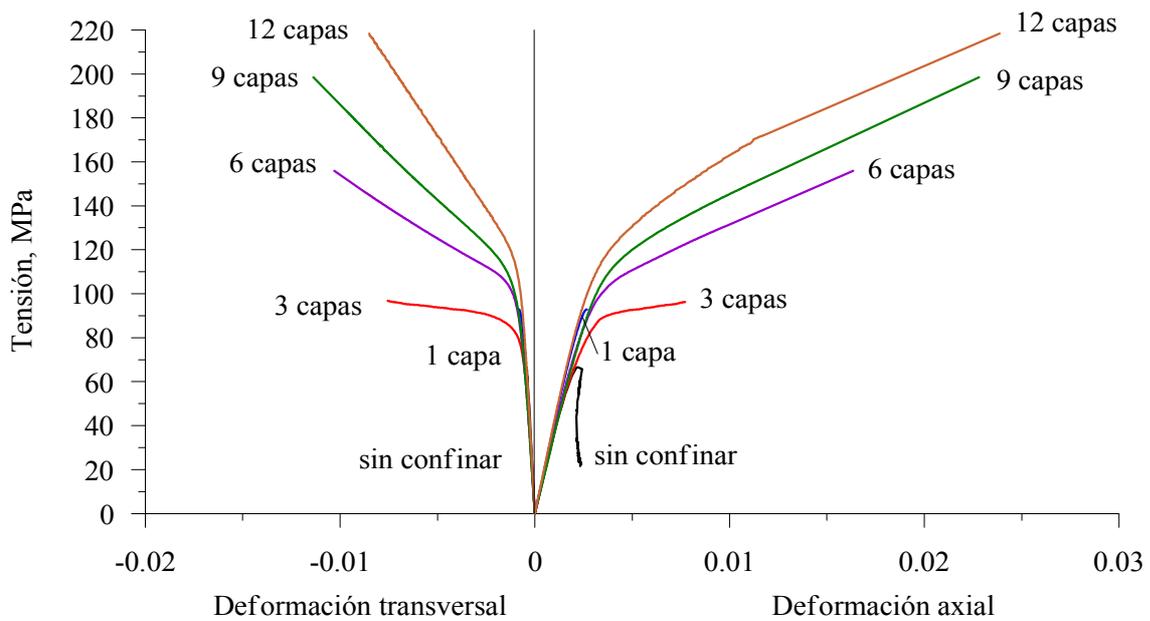


Figura 5.10 Curvas tensión-deformación del HF70 confinadas con FRP de carbono

De las Figuras 5.7 a 5.10, se puede decir que el comportamiento tensión-deformación del hormigón confinado con FRP puede dividirse en tres regiones. En la primera región el comportamiento es muy similar al hormigón sin confinar, sin embargo, la curva asciende más allá de la tensión máxima del hormigón sin confinar, sobretodo en el hormigón de alta resistencia. En esta región, las tensiones y deformaciones producidas sobre el hormigón, debido al confinamiento son muy pequeños. Cuando se incrementa el microagrietamiento, se presenta una zona de transición en la cual el FRP ejerce presión lateral sobre el hormigón que neutraliza la degradación de la sección de hormigón. Finalmente, en la tercera región, el hormigón empieza a agrietarse y se activa totalmente el FRP, incrementando la capacidad de resistencia, capacidad de absorción de energía y ductilidad de las probetas. La respuesta en esta región es principalmente dependiente de la rigidez del FRP. En todos los casos de multicapas de FRP, la pendiente del régimen post-agrietamiento (tercera región de la curva), se incrementa con el número de capas. Es importante señalar que no fue posible obtener información total hasta la tensión máxima en el caso de las curvas tensión-deformación axial y en algunos casos para las curvas tensión-deformación transversal debido al desprendimiento de las galgas antes de la rotura final. En la mayoría de los casos, el valor máximo registrado por las galgas promedió las 12000 $\mu\epsilon$ (ver Tabla I.33 del Anexo I). Sin embargo, para dibujar las curvas tensión-deformación axial y transversal de las Figuras 5.7 a 5.10 se consideraron los registros de los desplazamientos del pistón de la prensa de ensayo, el cual contiene información hasta el término del ensayo (carga máxima). Para obtener el tramo restante de la curva se hizo una correlación entre los registros de los desplazamientos del pistón y de las galgas con lo cual se encontraron las deformaciones hasta la tensión máxima. En las curvas tensión-deformación del hormigón de baja resistencia confinado con FRP, el cambio de pendiente ocurrió alrededor de la tensión máxima y su correspondiente deformación del hormigón sin confinar. Esto indica que el confinamiento es efectivo solo después que el hormigón empieza a agrietarse. Para el hormigón de alta resistencia confinado con FRP el cambio de pendiente ocurrió más allá de la tensión máxima del hormigón sin confinar. Además, la pendiente de la respuesta post-agrietamiento o de endurecimiento (*hardening* en inglés) y la deformación última (es decir, el final de la curva) se incrementa con el número de capas de FRP. Similares resultados fueron obtenidos en trabajos previos con materiales similares (Mirmiran y Shahawy, 1997; Karbhari y Gao, 1997; Xiao y Wu, 2000). Por otro lado, en el caso de los hormigones confinados con FRP de vidrio, se observa una caída de la tensión después del alcanzar el máximo valor para cierto número de capas de confinamiento. Sin embargo, esta caída no es tan repentina como en el caso del hormigón sin confinar (Ver Figuras 5.7 y 5.9). A continuación se hace un breve análisis de las figuras.

En la Figura 5.7 se muestra el comportamiento del hormigón de baja resistencia HF30 sin confinar y confinado con multicapas de FRP de vidrio. La curva tensión-deformación axial del hormigón sin confinar es una curva típica compuesta por un tramo inicial lineal, un régimen pre-pico no lineal, un pico bien definido y el régimen post-pico caracterizado por la disminución continua de la tensión con aumento de deformación, que se denomina ablandamiento (*softening* en inglés). En el caso de 1 capa de confinamiento, el

comportamiento es bastante similar al hormigón sin confinar hasta la tensión máxima, seguido por una meseta plástica (*plastic plateau* en inglés), con grandes deformaciones. Con 3 y 6 capas la curva muestra un comportamiento de endurecimiento con grandes deformaciones. En el caso de las curvas tensión-deformación transversal, para 1 capa de confinamiento se observa un significativo incremento de la deformación transversal respecto del hormigón sin confinar. Sin embargo, aunque la pendiente del post-pico de la curva se incrementa con el incremento en el número de capas de FRP, las máximas deformaciones transversales no se incrementan significativamente, especialmente para 3 o más capas. Esto implica que el modo de fallo está controlado por la rotura del FRP a cierta deformación máxima.

El comportamiento del hormigón de alta resistencia HF70 sin confinar y confinado con multicapas de FRP de vidrio, se muestra en la Figura 5.9. En este caso, la pendiente del régimen post-pico de ablandamiento (brazo descendente) de la curva tensión-deformación axial del hormigón sin confinar es mayor con relación al hormigón sin confinar de baja resistencia, lo que indica una menor ductilidad, por lo tanto mayor fragilidad. Para 1 capa de confinamiento aún existe un régimen de ablandamiento; mientras que para 3 capas se alcanza el *plastic plateau*, en contraste con 1 capa en el caso del hormigón de baja resistencia. Para 6 capas de confinamiento hay una pequeña zona de ablandamiento seguido de una zona de endurecimiento bien definida. Para mayor número de capas, hay un continuo brazo de endurecimiento. Sin embargo, el incremento de la deformación no es tan significativo para mas de 9 capas de FRP. Por otro lado, si comparamos las curvas tensión-deformación axial de los hormigones de baja y alta resistencia confinados con multicapas de FRP de vidrio (Ver Figuras 5.7 y 5.9) se podría decir que los incrementos de deformación axial son mayores en el caso del hormigón de baja resistencia, aún para 12 capas en el caso del hormigón de alta resistencia. Esto significa que el confinamiento con FRP de vidrio es más efectivo en el hormigón de baja resistencia. En el caso de las curvas tensión-deformación transversal, para 1 capa de confinamiento hay un significativo incremento de la deformación transversal respecto del hormigón sin confinar. Sin embargo, los incrementos no son tan significativos para mas de 6 capas de confinamiento

En la Figura 5.8 se muestra el comportamiento del hormigón de baja resistencia HF30 sin confinar y confinado con multicapas de FRP de carbono. Las curvas tensión-deformación axial de los hormigones confinados (para todas las capas) muestran un claro comportamiento de endurecimiento en el régimen post-pico, con grandes incrementos de resistencia y deformación, en comparación con el hormigón sin confinar. Si comparamos las curvas tensión-deformación axial de los hormigones de baja resistencia confinados con FRP de vidrio y carbono (Ver Figuras 5.7 y 5.8) se podría decir que los incrementos de deformación axial son mayores en el caso del FRP de carbono. Esto puede atribuirse al mayor módulo de elasticidad y resistencia a tracción del FRP de carbono. En el caso de las curvas tensión-deformación transversal, para 1 capa de confinamiento se observa grandes incrementos en la deformación transversal respecto del hormigón sin confinar. Para 3 o más capas, aunque la

pendiente de la curva se incrementa con el incremento del número de capas, las máximas deformaciones no se incrementan significativamente.

El comportamiento del hormigón de alta resistencia HF70 sin confinar y confinado con multicapas de FRP de carbono, se muestra en la Figura 5.10. En este caso, las curvas tensión-deformación axial de los hormigones confinados muestran un comportamiento de endurecimiento en el régimen post-pico, con grandes incrementos de tensión y deformación. En este caso, los incrementos en la deformación no son tan efectivos para 9 o más capas. Si comparamos las curvas tensión-deformación axial de los hormigones de baja y alta resistencia confinados con multicapas de FRP de carbono (Ver Figuras 5.8 y 5.10) se podría decir que los incrementos de deformación axial son mayores en el hormigón de baja resistencia. Igual que en el caso anterior, el confinamiento con FRP de carbono es más efectivo en el hormigón de baja resistencia. Por otro lado, si comparamos las curvas tensión-deformación axial de los hormigones de alta resistencia confinados con FRP de vidrio y carbono (Ver Figuras 5.9 y 5.10) se podría decir que las máximas deformaciones son mayores en el caso del FRP de carbono, excepto para el caso de 1 capa de FRP de carbono. En el caso de las curvas tensión-deformación transversal, para 3 capas se observa grandes incrementos de la deformación transversal respecto del hormigón sin confinar. Sin embargo, para 6 o más capas estos incrementos no son tan significativos.

5.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Tabla 5.5 presenta los resultados de los ensayos, donde f'_{cmax} es la tensión máxima del hormigón confinado que corresponde al valor de la carga máxima alcanzada en el ensayo de compresión, ϵ_{max} , ϵ_{tmax} su correspondiente deformación axial y transversal, respectivamente, y E_i el módulo inicial. Los valores de tensión máxima y sus correspondientes deformaciones axiales y transversales del hormigón sin confinar son f'_c , ϵ_c y ϵ_t , respectivamente.

5.6.1 Tensión máxima

Los resultados de la Tabla 5.5, muestran un significativo incremento de la tensión y deformación debido al confinamiento con FRP. Sin embargo, el confinamiento es más eficiente en el hormigón de baja resistencia. Para el mismo tipo de hormigón, el confinamiento con FRP de carbono es más eficiente que con FRP de vidrio. Existe un leve incremento del módulo de elasticidad debido al efecto del confinamiento. A continuación se describen algunos detalles de los resultados.

Tabla 5.5 Resultados de los ensayos de hormigón confinado con FRP

Hormigón	Nº Capas	f'_{cmax} MPa	ϵ_{max} $\mu\epsilon$	E_i GPa	f'_{cmax}/f'_c	$\epsilon_{max}/\epsilon_c$	ϵ_{tmax} $\mu\epsilon$	$\epsilon_{tmax}/\epsilon_t$
	0	$f'_c = 42$	$\epsilon_c = 2390$	$E_c = 25.0$	1.0	1.0	$\epsilon_t = 635$	1.0
	FRPV							
	1	41	2530	27.6	1.0	1.1	880	1.4
	3	61	17120	34.0	1.5	7.2	12810	20.2
HF30	6	85	20190	32.3	2.0	8.4	11290	17.8
	FRPC							
	1	46	9200	26.8	1.1	3.8	8840	13.9
	3	77	21160	28.2	1.8	8.8	9270	14.6
	6	108	31620	29.0	2.6	13.2	10500	16.5
	0	$f'_c = 69$	2400	$E_c = 35$	1.0	1.0	$\epsilon_t = 435$	1.0
	FRPV							
	1	79*	2350	39.2	1.1	1.0	1090	2.5
	3	83*	2650	37.5	1.2	1.1	2030	4.7
	6	107*	6180	40.1	1.5	2.6	8940	20.5
	9	140*	14120	38.2	2.0	5.9	9690	22.3
HF70	12	170	14710	40.2	2.5	6.1	11030	25.3
	FRPC							
	1	94*	2690	40.7	1.3	1.1	870	2.0
	3	98*	7760	35.4	1.4	3.2	8210	18.9
	6	156	16340	37.3	2.3	6.8	10300	23.7
	9	199*	22810	35.8	2.9	9.5	11370	26.1
	12	217	23870	41.7	3.1	9.9	8500	19.5

* Promedio de 2 valores

En el caso del hormigón de baja resistencia HF30, no existe incremento en la tensión cuando es confinado con 1 capa de FRP de vidrio. Sin embargo, para 3 capas hay un incremento del 50%, mientras que para 6 capas la tensión se incrementa en 100%, es decir, duplica su valor. En el caso del hormigón de baja resistencia HF30 confinado con FRP de carbono, se observa un incremento del 10% en la tensión cuando es confinado con 1 capa. Para 3 capas hay un incremento del 80%, mientras que para 6 capas el incremento en la tensión es de 160%. La comparación de estos resultados permite establecer que la eficiencia de confinamiento es dependiente del tipo de FRP, siendo mayor en el caso del confinamiento con FRP de carbono.

Similarmente, en el caso del hormigón de alta resistencia HF70 confinado con multicapas de FRP de carbono y vidrio se observa grandes incrementos en la tensión. Como en el caso anterior, estos incrementos son más significativos cuando son confinados con FRP de

carbono. Así por ejemplo, cuando el hormigón es confinado con 6 capas de FRP de vidrio el incremento es de 50%, mientras que para confinamiento con FRP de carbono es de 130%. De la misma manera, cuando es confinado con 12 capas de FRP de vidrio hay un incremento de 150%, mientras que es 210% para el FRP de carbono.

Si comparamos los resultados de los dos tipos de hormigón confinados con el mismo tipo de FRP, se puede decir que en el caso del hormigón de baja resistencia HF30 es suficiente 6 capas de FRP para duplicar la tensión del hormigón sin confinar, mientras que para el hormigón de alta resistencia HF70, se necesitan 9 capas de FRP de vidrio, para obtener este valor. De la misma manera, para 6 capas de FRP de carbono la ganancia en resistencia es de 160% en el caso del hormigón de baja resistencia HF30, mientras que para el hormigón de alta resistencia el incremento es de 130%.

En general, el confinamiento con FRP de carbono es más efectivo en incrementar la resistencia del hormigón, sin embargo, la eficiencia del confinamiento es mayor en el hormigón de baja resistencia.

Por otro lado, la Tabla 5.6 presenta las tensiones de confinamiento reales que ejercen los FRP sobre el núcleo de hormigón, calculadas con la siguiente expresión (Pessiki et al., 2001):

$$f_l = \frac{2nE_{fs}}{D} \epsilon_{ju} \quad (5.1)$$

donde, n es el número de capas de FRP, E_{fs} es la rigidez del compuesto calculada experimentalmente (ver Tabla 5.1), D es el diámetro de la probeta y ϵ_{ju} la deformación del FRP. Esta deformación se ha tomado como la deformación transversal medida en el momento de la carga máxima.

Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran el incremento de la tensión máxima f'_{cmax} como una función de la tensión de confinamiento experimental f_l . Además se presenta una comparación entre los resultados experimentales obtenidos en esta investigación con algunas expresiones disponibles en la literatura (Toutanji, 1999; Miyauchi et al., 1997, ver las expresiones en el Anexo D).

Tabla 5.6 Tensiones de confinamiento real

Hormigón	Capas n	Tensión de confinamiento, MPa f_l
HF30	FRP Vidrio	
	1	0.14
	3	6.29
	6	11.09
	FRP Carbono	
	1	2.81
HF70	FRP Vidrio	
	1	0.18
	3	1.00
	6	8.78
	9	14.28
	12	21.67
	FRP Carbono	
	1	0.28
	3	7.83
	6	19.65
9	32.54	
12	32.44	

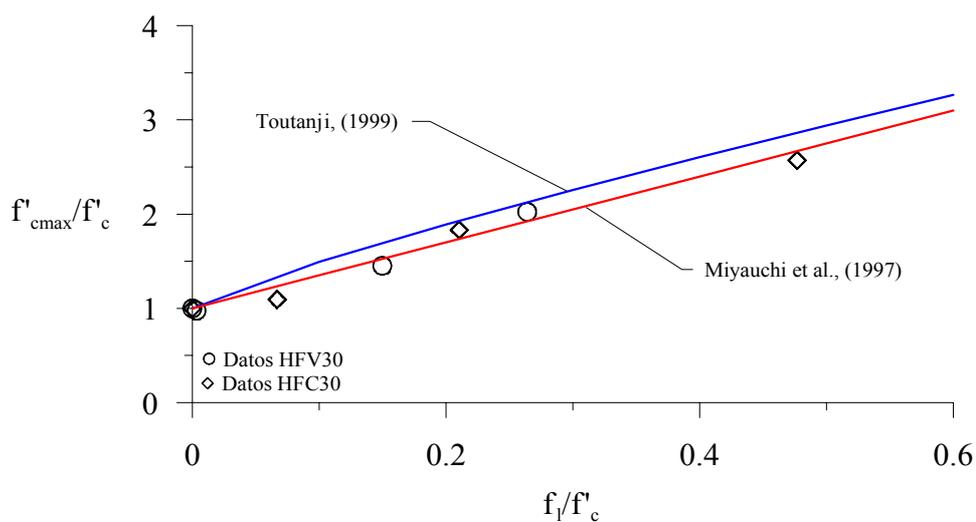


Figura 5.11 Relación entre la tensión máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio y carbono

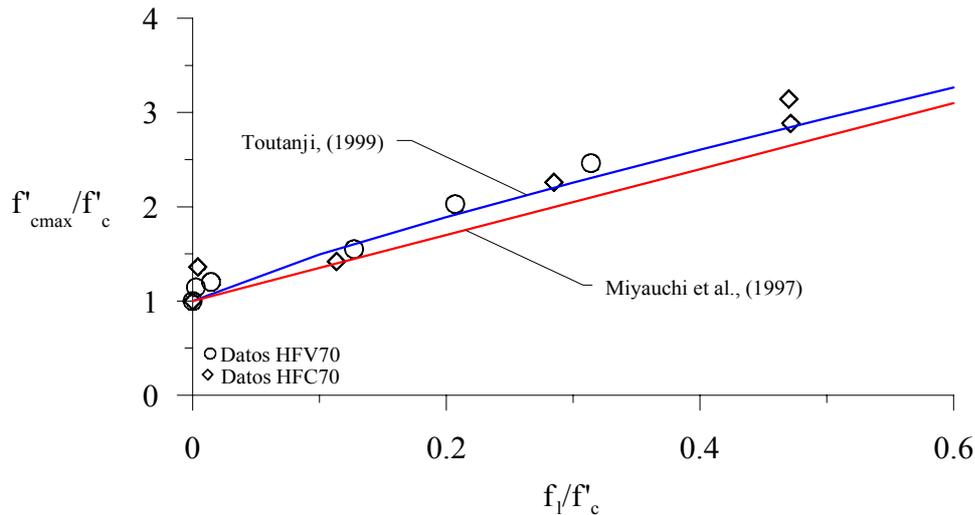


Figura 5.12 Relación entre la tensión máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio y carbono

En el caso del hormigón de baja resistencia HF30 confinado con FRP de carbono, los resultados experimentales son bastante comparables con la expresión propuesta por Miyauchi et al. (1997) quienes ensayaron probetas cilíndricas de 150×300 mm y de 100×200 confinadas con 1 a 3 capas de FRP de carbono, en hormigones de 25 MPa y 35 MPa. En el caso del hormigón de alta resistencia, los resultados experimentales son comparables con la expresión propuesta por Toutanji (1999) quien ensayó probetas cilíndricas de 76×305 mm confinadas con 2 capas de FRP de carbono y vidrio en hormigón de 31 MPa.

5.6.2 Ductilidad

El efecto más importante del confinamiento con FRP es la deformación axial a rotura. La Tabla 5.5 muestra que la deformación axial de los hormigones confinados con FRP, es considerablemente mayor que la deformación correspondiente al hormigón sin confinar. Por otro lado, si consideramos el valor $\varepsilon_{max}/\varepsilon_c$ como un índice de ductilidad, se puede establecer que la ductilidad se incrementa cuando se incrementa el número de capas de FRP. Sin embargo, se observa que este incremento es más significativo en el caso de los FRP de carbono que en el caso de los FRP de vidrio. Esto puede atribuirse al mayor módulo de elasticidad y resistencia a tracción del FRP de carbono. Por otro lado, el incremento del índice de ductilidad es mayor en el caso del hormigón de baja resistencia HF30 en comparación con el hormigón de alta resistencia HF70. A continuación se hace una comparación entre los resultados obtenidos y se describen algunos aspectos de las tendencias observadas.

En el caso del hormigón de baja resistencia HF30 confinado con 1 capa de FRP de vidrio el índice de ductilidad es 1.1, sin embargo, es 3.8 cuando es confinado con FRP de carbono. Asimismo, para 6 capas de confinamiento de FRP de vidrio este índice es de 8.4 mientras que

para el mismo número de capas de FRP de carbono es 13.2. Parece que el FRP de carbono es más efectivo que el FRP de vidrio.

En el caso del hormigón de alta resistencia, igualmente parece que el FRP de carbono es más efectivo que el FRP de vidrio. Así por ejemplo, para 6 capas de FRP de vidrio el índice es de 2.6, mientras que para el FRP de carbono es casi 7. Del mismo modo, para 12 capas de FRP de vidrio el índice es 6, mientras que para el FRP de carbono es casi 10. Sin embargo, si comparamos ambos hormigones, se puede decir que los índices del hormigón de alta resistencia son menores a los correspondientes valores en el hormigón de baja resistencia. Por ejemplo, en el hormigón de alta resistencia HF70 con 6 capas de FRP de vidrio el índice de ductilidad es 2.6, mientras que para el hormigón de baja resistencia HF30 es 8.4. De la misma manera, para el hormigón de alta resistencia HF70 con 6 capas de FRP de carbono el índice de ductilidad es casi 7, mientras que para el hormigón de baja resistencia HF30 es 13.2.

Deformaciones transversales

La Tabla 5.5 muestra también que las deformaciones transversales se incrementan debido al efecto del confinamiento con FRP. Sin embargo, en el caso del hormigón de baja resistencia este incremento no es tan significativo para más de 3 capas.

En el hormigón de baja resistencia HF30 confinado con 3 capas de FRP de vidrio, se obtienen incrementos en la deformación transversal del orden de 20 veces la correspondiente deformación transversal del hormigón sin confinar. Sin embargo, para 6 capas el incremento es casi 18 veces. De la misma manera, para 3 capas de FRP de carbono, el incremento es del orden de 15 veces la deformación transversal del hormigón sin confinar. En este caso, para 6 capas el incremento fue de casi 17 veces la del hormigón sin confinar.

En el hormigón de alta resistencia HF70, el comportamiento es similar. Para 6 capas de FRP de vidrio, se obtuvieron incrementos en la deformación transversal del orden de 20 veces la correspondiente deformación transversal del hormigón sin confinar, incrementándose ligeramente para 9 y 12 capas. Del mismo modo, para 9 capas de FRP de carbono hubo un incremento de 26 veces la deformación transversal del hormigón sin confinar, el cual disminuyó para 12 capas.

Propiedades de dilatación

Generalmente el hormigón bajo compresión es caracterizado mediante la respuesta tensión-deformación axial. Sin embargo, esta relación no es suficiente para describir el comportamiento del hormigón confinado con FRP, el cual está sometido a un estado de tensión triaxial, que debe tomarse en cuenta. Para describir mejor el comportamiento del hormigón confinado con FRP, se debe examinar su respuesta volumétrica. En un estado de

tensiones triaxial, la deformación volumétrica (dilatación) ε_v es definida como el cambio de volumen por unidad de volumen (Chen, 1982), y se calcula mediante la expresión:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_l + 2.\varepsilon_t \quad (5.2)$$

donde ε_l es la deformación axial y ε_t es la deformación transversal. Un valor positivo de ε_v representa una reducción de volumen (compactación) mientras que un valor negativo indica expansión de volumen (dilatación). Se sabe que el hormigón simple experimenta una reducción de volumen hasta $0.90f'_c$, después del cual el cambio de volumen se invierte, resultando en una expansión o dilatación de volumen cerca del f'_c y una expansión inestable mas allá de la resistencia máxima (Chen, 1982).

Las Figuras 5.13 a 5.16 muestran las curvas tensión axial versus la deformación volumétrica de los hormigones estudiados. Las figuras muestran que todos los hormigones experimentan una compactación bajo carga axial hasta alcanzar un valor de tensión crítica, a partir del cual se inicia una expansión volumétrica. En general, se observa una tendencia típica en las curvas volumétricas del hormigón confinado, siendo muy similares al del hormigón sin confinar cuando el hormigón es confinado con 1 capa de FRP.

En el caso del hormigón de baja resistencia HF30 confinado con FRP de vidrio (ver Figura 5.13) la curva volumétrica para 1 capa de confinamiento es muy similar a aquella del hormigón sin confinar. Al incrementar el número de capas hay una inversión de la curva. La tendencia inicial es bastante similar, pero después actúa el FRP reduciendo la deformación transversal, provocando un endurecimiento de la probeta, como es el caso del hormigón confinado con 6 capas de FRP de vidrio. En el caso del mismo hormigón confinado con FRP de carbono el endurecimiento se presenta para 3 capas de confinamiento donde se observa la inversión de la curva (ver Figura 5.14).

En el caso del hormigón de alta resistencia HF70 confinado con FRP de vidrio (ver Figura 5.15) aún cuando no hubo inversión de la curva es evidente que con un número adecuado de FRP, se puede reducir eficazmente la expansión lateral del hormigón. En este caso es necesario mayor número de capas para lograr el endurecimiento del material. Para el mismo hormigón confinado con FRP de carbono parece ser necesario 9 capas de confinamiento para alcanzar la inversión de la curva, por lo tanto, alcanzar el endurecimiento del hormigón.

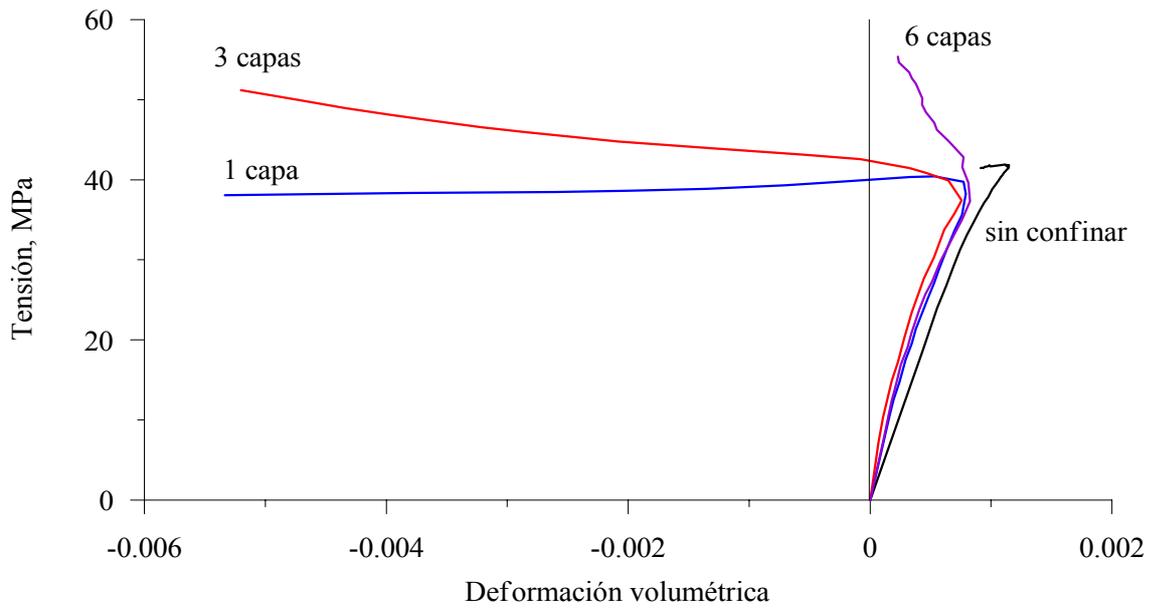


Figura 5.13 Curvas de deformación volumétrica del HF30 confinadas con FRP de vidrio

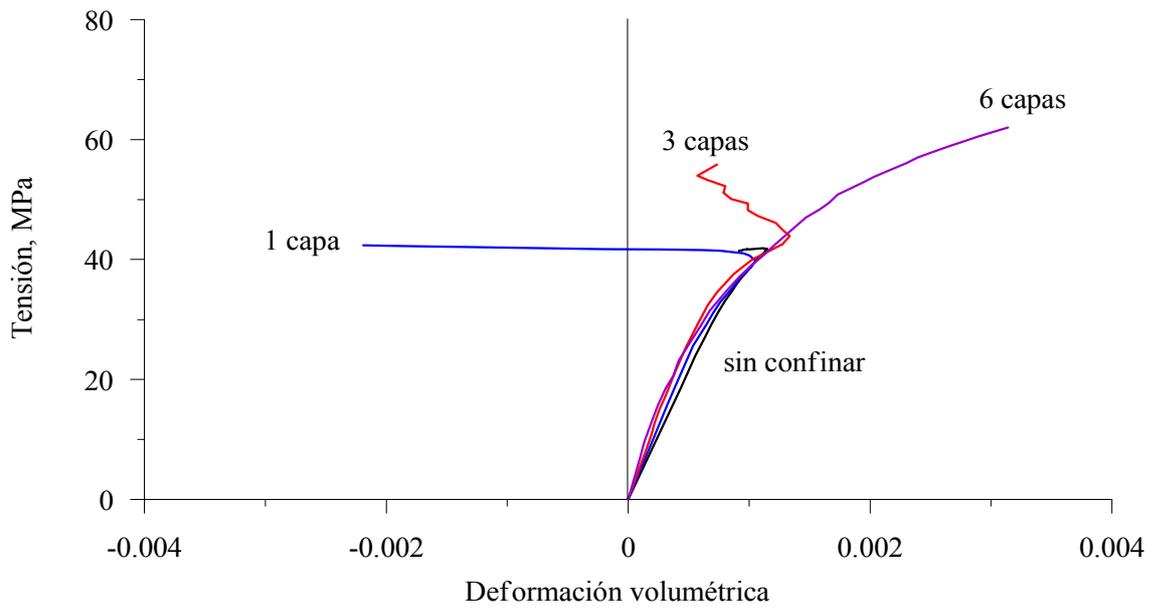


Figura 5.14 Curvas de deformación volumétrica del HF30 confinadas con FRP de carbono

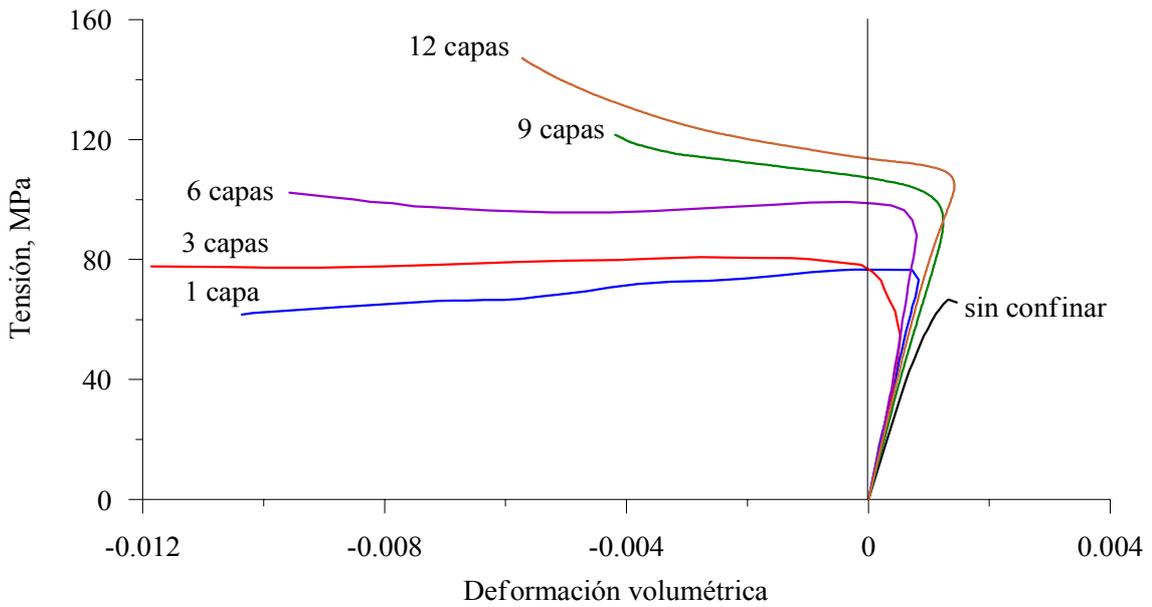


Figura 5.15 Curvas de deformación volumétrica del HF70 confinadas con FRP de vidrio

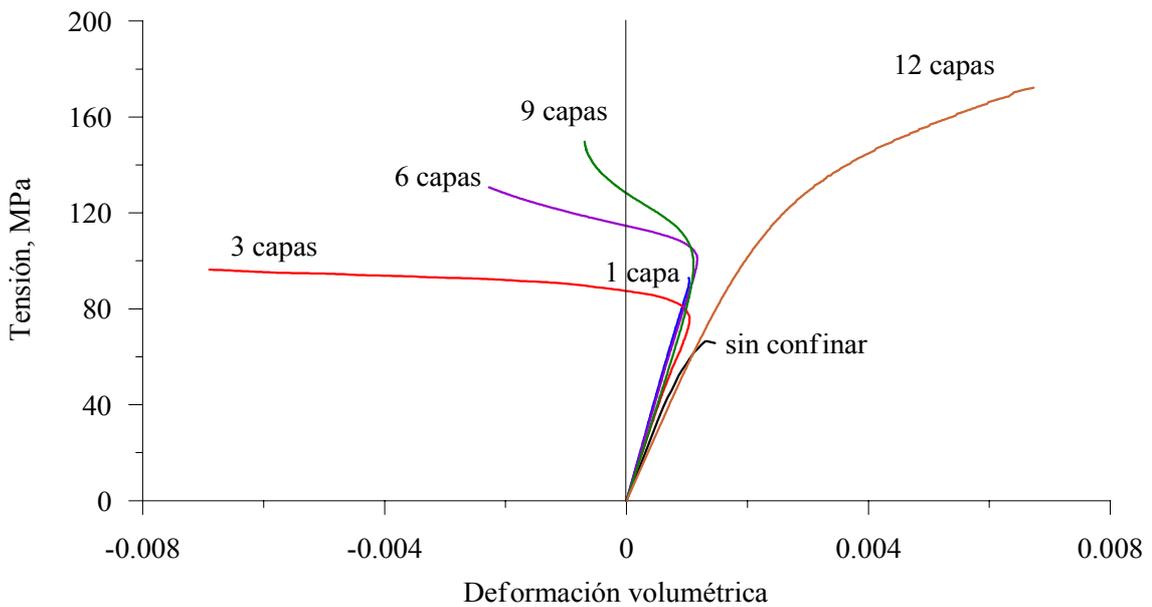


Figura 5.16 Curvas de deformación volumétrica del HF70 confinadas con FRP de carbono

Aunque existe expansión volumétrica posterior a la tensión máxima, la acción del FRP reducirá la expansión de volumen que genera la inversión de la curva antes mencionada. Esta característica del hormigón confinado con FRP se puede explicar mejor evaluando el cambio de deformación volumétrica. Tomando derivada de la Ecuación (5.2) con respecto a la deformación lateral, se tiene:

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_l} = 1 + 2 \frac{d\varepsilon_t}{d\varepsilon_l} = 1 + 2\mu \quad (5.3)$$

donde μ representa la variación de la deformación transversal con respecto a la deformación axial, denominada dilatación. Las Figuras 5.17 a 5.20 muestran las curvas de dilatación versus la deformación axial de los hormigones estudiados. La dilatación experimental para cada dos lecturas consecutivas, fue calculada como:

$$\mu_{\text{exp}} = \frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} = \frac{\varepsilon_{t(i)} - \varepsilon_{t(i-1)}}{\varepsilon_{l(i)} - \varepsilon_{l(i-1)}} \quad (5.4)$$

Las figuras muestran que la dilatación del hormigón sin confinar se incrementa con el desarrollo de las microgrietas llegando a ser inestable cerca de la tensión máxima. En el caso del hormigón confinado con FRP las curvas de la dilatación presentan 3 regiones: permanece constante cuando el hormigón se comporta elásticamente; se incrementa cuando se presenta un severo microagrietamiento; y finalmente alcanza un valor máximo, luego del cual tiende a disminuir y a estabilizarse en un valor, que depende de la resistencia del hormigón y el número de capas de confinamiento. La proporción de dilatación inicial es aproximadamente igual al coeficiente de Poisson del hormigón sin confinar. Además, los valores máximos de dilatación alcanzados fueron menores para los hormigones con mayor número de capas de FRP. Fenómenos similares fueron observados por Mirmiran y Shahawy (1997). A continuación se detallan algunos aspectos de las curvas.

De la Figura 5.17 se puede decir que la dilatación del hormigón de baja resistencia HF30 confinado con FRP de vidrio está en función del número de capas de confinamiento. Para 1 capa de confinamiento los valores son altos, debido a la mayor expansión volumétrica (ver Figura 5.13). Cabe recordar que este hormigón no alcanza el estado de endurecimiento como se muestra en la Figura 5.7, debido a que el número de capas es insuficiente para incrementar la resistencia del hormigón sin confinar. Con 3 capas de confinamiento la dilatación disminuye porque el hormigón alcanza el estado de endurecimiento (ver Figura 5.7), lo cual genera una ligera inversión de la curva volumétrica (ver Figura 5.13). Para 6 capas de confinamiento la dilatación tiende a estabilizarse debido al endurecimiento del hormigón (ver Figura 5.7), además porque se presenta una inversión total de la curva volumétrica lo que indica una reducción de volumen ó compactación (ver Figura 5.7). Del mismo modo, en el hormigón HF30 confinado con FRP de carbono el comportamiento es similar, como se observa en la Figura 5.18. La dilatación es mayor para 1 capa de confinamiento debido a la mayor expansión volumétrica (ver Figura 5.14), además el número de capas es insuficiente para alcanzar el estado de endurecimiento (ver Figura 5.8). Para 3 capas de confinamiento la dilatación disminuye y tiende a estabilizarse para 6, debido a la inversión de la curva volumétrica (ver Figura 5.14) y al endurecimiento del hormigón (ver Figura 5.8).

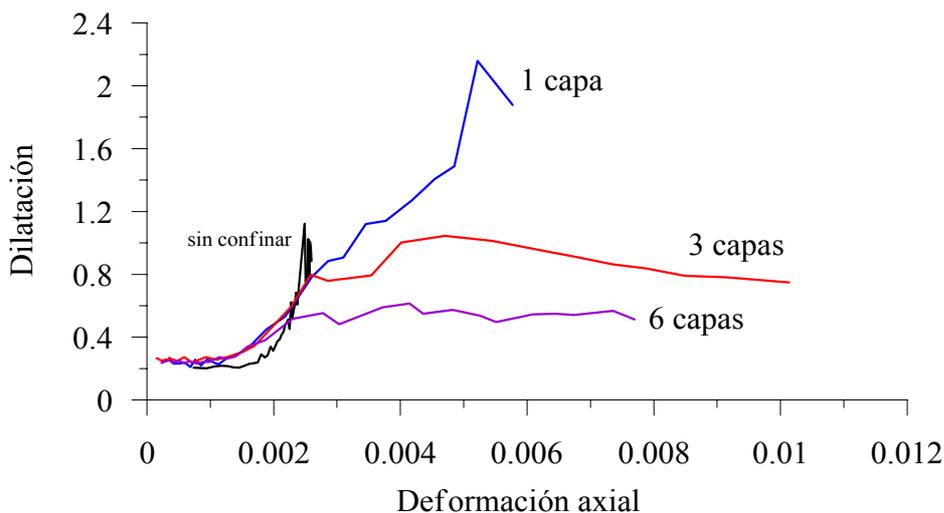


Figura 5.17 Dilatación del hormigón H30 confinado con FRP de vidrio

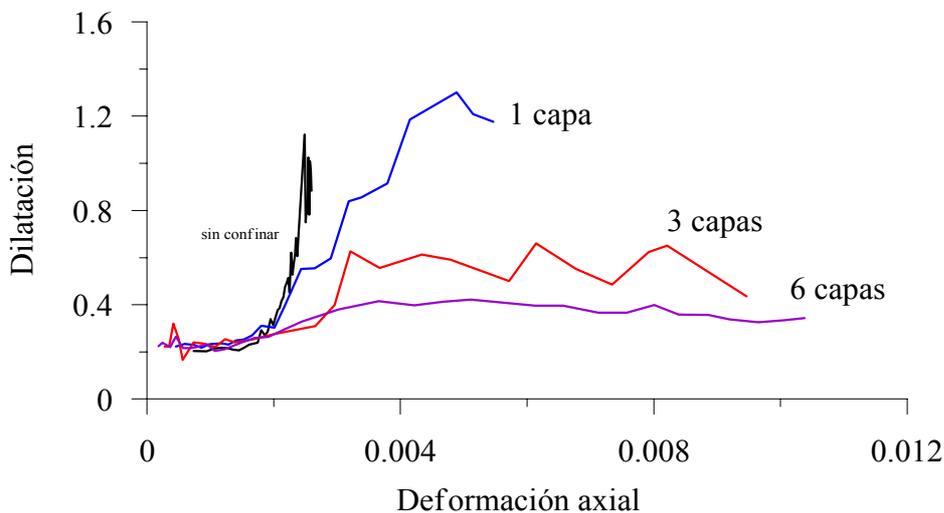


Figura 5.18 Dilatación del hormigón HF30 confinado con FRP de carbono

En el caso del hormigón de alta resistencia HF70 confinado con FRP la tendencia es similar, como se observa en las Figuras 5.19 y 5.20. Sin embargo, de la Figura 5.19 se puede decir que la dilatación del hormigón HF70 confinado con 3 y 6 capas FRP de vidrio es aún elevada debido a la expansión volumétrica (ver Figura 5.15) y porque el hormigón experimenta un ablandamiento después de la tensión máxima (ver Figura 5.9). En este caso se necesitan 9 capas para llegar al régimen de endurecimiento, que es coincidente con la inversión de la curva volumétrica (ver Figura 5.15) y la respuesta tensión-deformación axial de la Figura 5.9. De la misma forma de la Figura 5.20, los valores de dilatación son elevados para 3 capas de confinamiento, con tendencia a estabilizarse para 9 y 12 capas, que coincide con la inversión de la curva volumétrica (ver Figura 5.16).

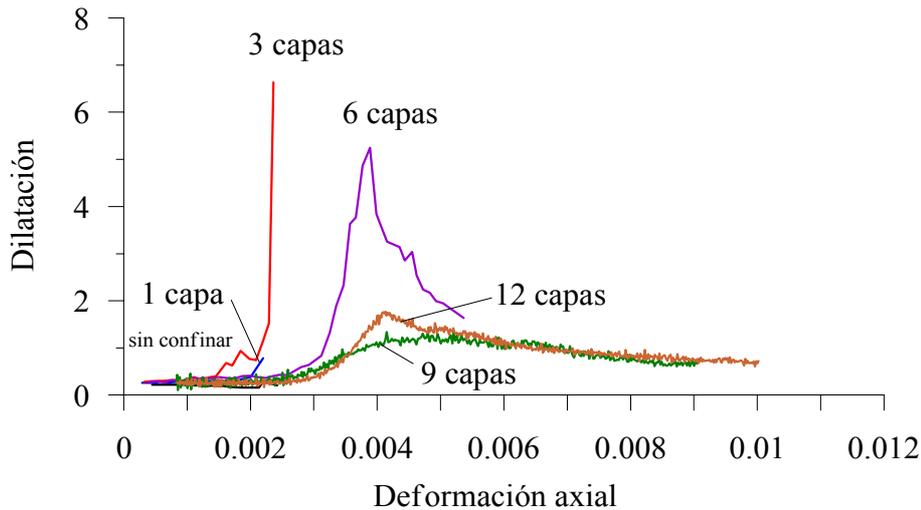


Figura 5. 19 Dilatación del hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio

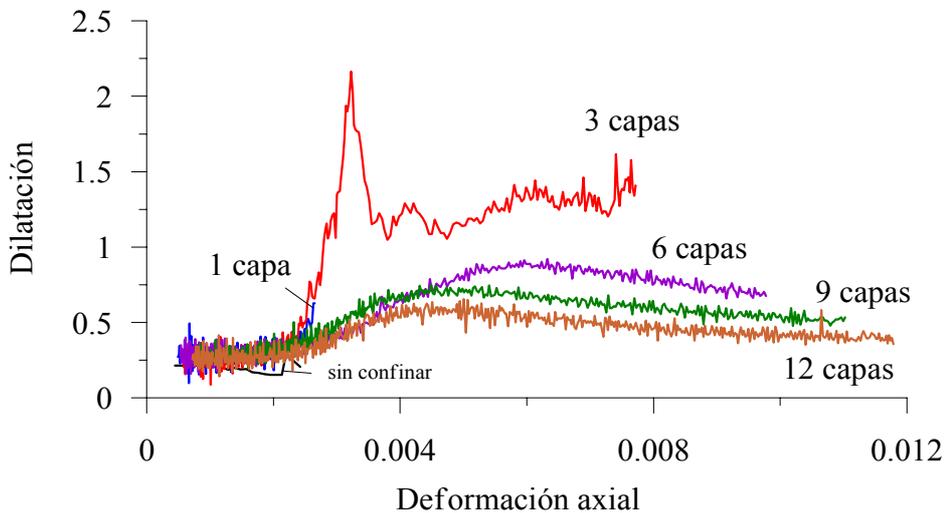


Figura 5.20 Dilatación del hormigón HF70 confinado con FRP de carbono

Un comportamiento muy similar a la dilatación se observa en las Figuras 5.21 a 5.24, que muestra las curvas deformación transversal/deformación axial versus deformación axial. En general, se puede decir que pequeños valores de ϵ_t/ϵ_c (deformación transversal/deformación axial) indica mayor resistencia y mayor rigidez, lo cual permite alcanzar mayores deformaciones axiales antes de que ocurra la rotura. Las curvas que se muestran en las figuras consisten de 3 regiones: una parte inicial constante, seguida de una parte lineal ascendente, hasta estabilizarse en un valor. A medida que se incrementa el número de capas de confinamiento la relación de ϵ_t/ϵ_c es menor.

En el caso del hormigón de baja resistencia HF30 (Figuras 5.21 y 5.22), la relación ϵ_t/ϵ_c para el hormigón sin confinar es constante e igual a 0.21 hasta una deformación axial de alrededor de $1200 \mu\epsilon$, que corresponde a una tensión del orden de 29.2 MPa ($0.71 \cdot f'_c$). Estos resultados están en concordancia con lo establecido por otros investigadores (Chen; 1982) quienes establecen que un hormigón sin confinar sometido a carga axial tiene un valor de ϵ_t/ϵ_c constante e igual al coeficiente de Poisson, hasta un nivel de resistencia del orden de $0.7 \cdot f'_c$. Igualmente mencionan que cuando la tensión axial está entre $0.7 \cdot f'_c$ y f'_c , la relación ϵ_t/ϵ_c se incrementa rápidamente hasta un valor cercano a 0.5. Además, indican que el post-pico se caracteriza por una rápida expansión y el valor ϵ_t/ϵ_c se incrementa a valores mayores de 0.5. Aún cuando la información que se muestra en las Figuras 5.21 y 5.22 para el hormigón sin confinar no permite confirmar lo anterior, se observa que el valor de la relación ϵ_t/ϵ_c muestra cierta tendencia a incrementar. Además, se puede decir que la relación ϵ_t/ϵ_c para el hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio permanece relativamente constante entre 0.24 y 0.26 hasta una deformación axial del orden de $2400 \mu\epsilon$ (ver Figura 5.21). Este nivel de deformación corresponde aproximadamente a la tensión máxima del hormigón sin confinar. De la misma forma, para el hormigón HF30 confinado con FRP de carbono la relación ϵ_t/ϵ_c permanece constante entre 0.22 y 0.23 hasta una deformación del orden de $2300 \mu\epsilon$ (ver Figura 5.22).

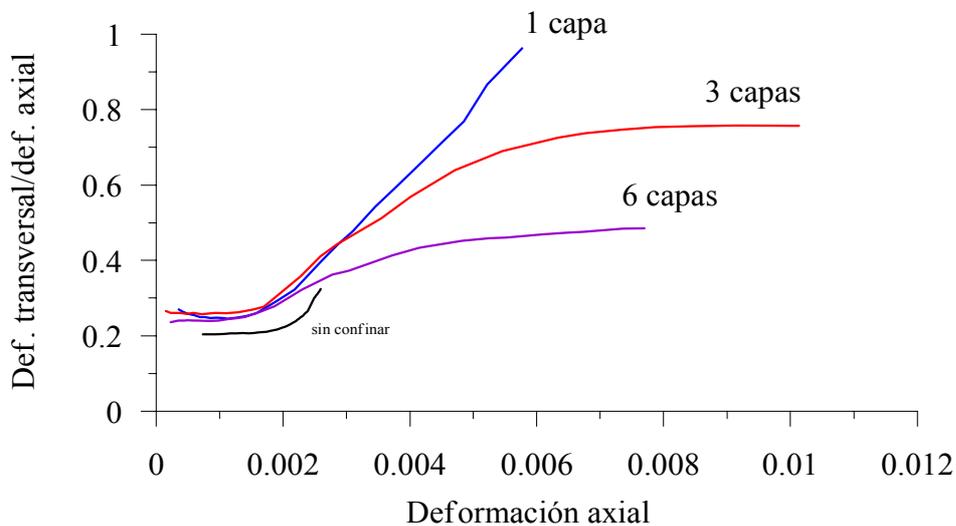


Figura 5.21 Curvas deformación transversal/deformación axial versus deformación axial del HF30 confinadas con FRP de vidrio

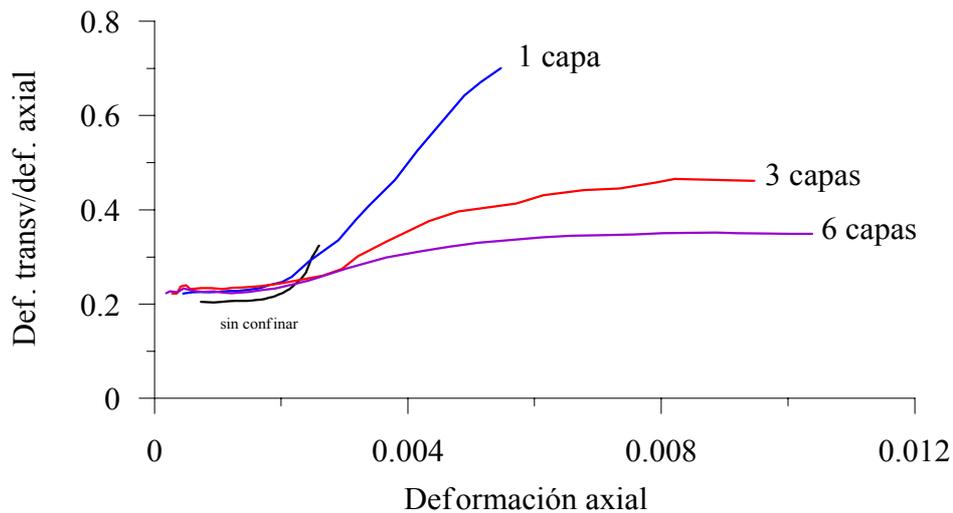


Figura 5.22 Curvas deformación transversal/deformación axial versus deformación axial del HF30 confinadas con FRP de carbono

Para hormigón de alta resistencia HF70 sin confinar (Figuras 5.23 y 5.24), la relación ϵ_t/ϵ_c es constante e igual a 0.21, pero no es posible definir hasta que nivel de deformación axial permanece constante por la falta de información. También, la relación ϵ_t/ϵ_c para el hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio permanece constante entre 0.26 y 0.29 hasta una deformación axial del orden de 2400 $\mu\epsilon$ (ver Figura 5.23). Este nivel de deformación corresponde aproximadamente a la tensión máxima del hormigón sin confinar. De la misma forma, para el hormigón HF70 confinado con FRP de carbono la relación ϵ_t/ϵ_c permanece constante entre 0.26 y 0.28 hasta una deformación del orden de 2100 $\mu\epsilon$ (ver Figura 5.24).

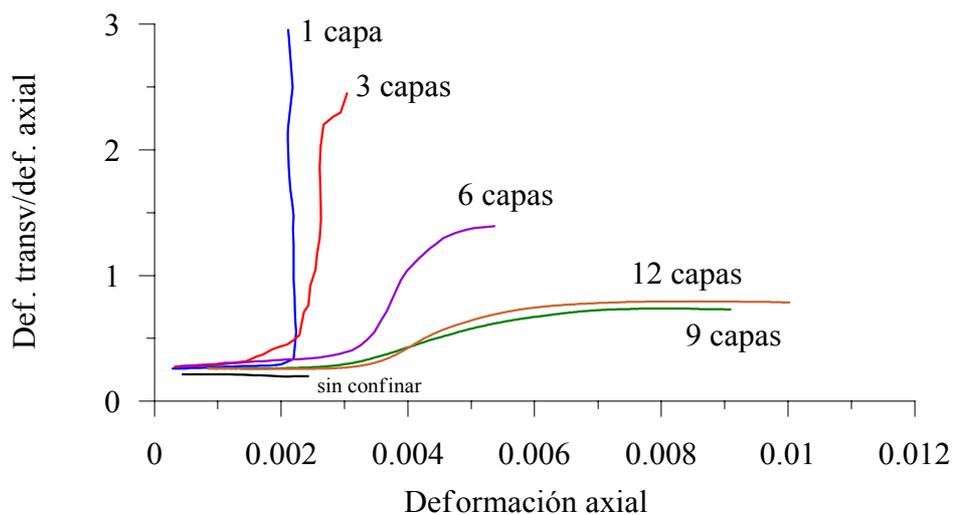


Figura 5.23 Curvas de deformación transversal/deformación axial versus deformación axial del HF70 confinadas con FRP de vidrio

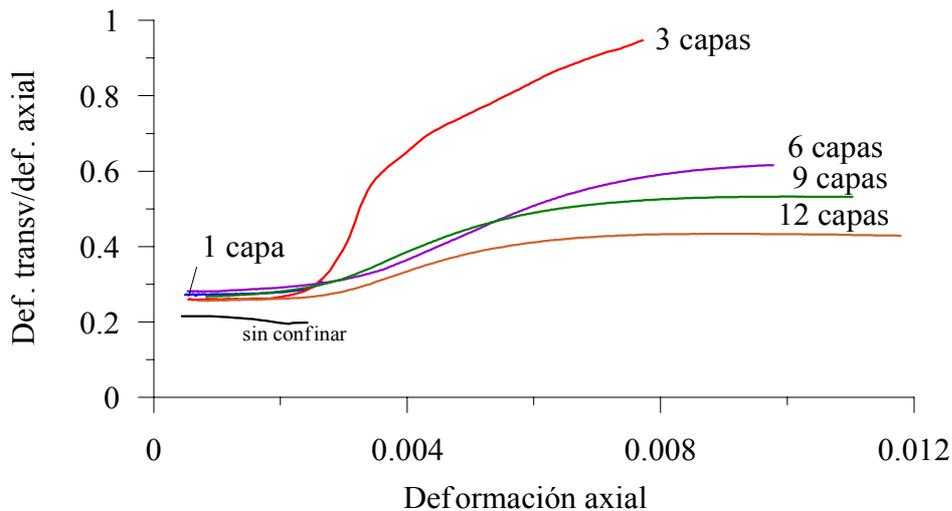


Figura 5.24 Curvas deformación transversal/deformación axial versus deformación axial del HF70 confinadas con FRP de carbono

5.7 CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento mecánico del hormigón sin confinar y confinado con polímeros reforzados con fibra (FRP). Los estudios se realizaron en hormigón de baja y alta resistencia, confinadas con múltiples capas de FRP, determinándose sus propiedades mecánicas y su comportamiento tensión-deformación.

Las principales conclusiones son las siguientes:

El confinamiento con polímeros reforzados con fibra (FRP) incrementa significativamente la resistencia y deformación del hormigón. Sin embargo, el confinamiento es más eficiente en el hormigón de baja resistencia.

Para múltiples capas de FRP de confinamiento, la respuesta presenta un comportamiento de endurecimiento en el post-pico, con significantes incrementos en la carga de rotura y la deformación correspondiente. La capacidad de carga y deformación en rotura se incrementa con el número de capas.

En el hormigón de baja resistencia, la fibra de carbono genera ligeramente mayores cargas y significativamente mayores deformaciones a rotura, lo que implica una mayor ductilidad. En el hormigón de alta resistencia, es evidente el mejor rendimiento de las fibras de carbono. Sin embargo, la capacidad de deformación a rotura del hormigón de alta resistencia confinado con fibra de carbono es mucho menor que en el hormigón de baja resistencia, aunque el incremento de la resistencia relativa es aproximadamente la misma.

Se puede alcanzar resistencias del orden de 2 veces la resistencia del hormigón sin confinar, cuando el hormigón de baja resistencia HF30 es confinado con 6 capas de FRP de vidrio. En el caso de las FRP de carbono, se alcanzan incrementos del orden de 2.6 veces la resistencia del hormigón sin confinar.

Los incrementos en resistencia en el hormigón de alta resistencia HF70 no son tan elevados como en el caso del hormigón de baja resistencia. Para 6 capas de FRP de vidrio, el incremento de resistencia en el hormigón HF70 fue 1.5 veces la resistencia del hormigón sin confinar, mientras que para el hormigón HF30 este incremento fue de 2 veces, para el mismo número de capas. Y para el hormigón de alta resistencia HF70 confinado con 6 capas de FRP de carbono el incremento fue de 2.3 veces mientras que para el hormigón de baja resistencia HF30 fue de 2.6 veces.

El índice de ductilidad se incrementa significativamente con el confinamiento con FRP, siendo mayor en el caso de los FRP de carbono. Para el hormigón de baja resistencia HF30 confinado con 6 capas de FRP de vidrio el índice de ductilidad fue alrededor de 8, mientras que para 6 capas de FRP de carbono fue alrededor de 13.

En el caso del hormigón de alta resistencia, los incrementos en el índice de ductilidad no fueron tan significativos como para el hormigón de baja resistencia. Para 6 capas de FRP de vidrio el índice de ductilidad fue de 2.6 para el hormigón de alta resistencia HF70, mientras que para el hormigón de baja resistencia HF30 este índice fue de 8.4. Asimismo, para el hormigón de alta resistencia HF70 confinado con 6 capas de FRP de carbono este índice fue de 6.8, mientras que para el hormigón de baja resistencia fue de 13.2. Aún para el doble del número de capas el índice de ductilidad del hormigón de baja resistencia HF30 es mayor que aquel del hormigón de alta resistencia HF70.

Las deformaciones transversales se incrementan con el confinamiento con FRP. Sin embargo, en el hormigón de baja resistencia este incremento no es tan significativo para más de 3 capas. Parece que el incremento de la deformación transversal está gobernada por la rotura del FRP en cierto valor de la deformación.

Las curvas de deformación volumétrica muestra que al incrementar el número de capas de FRP se reduce la deformación transversal de la probeta, provocando un endurecimiento de la probeta.

El modo de rotura de las probetas confinadas se debe a la rotura del FRP. En el caso de los FRP de vidrio, el modo de rotura fue menos explosivo que los FRP de carbón. Además, se observó una pequeña capa de hormigón o mortero adherido al FRP ensayado, lo que indica una buena adherencia entre el hormigón y el FRP.