



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 6**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

#### **6.1 INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores se ha estudiado individualmente el comportamiento del hormigón sometido a cada tipo de confinamiento. El confinamiento activo fue proporcionado por una célula triaxial, en la cual se introdujeron probetas cilíndricas de hormigón que fueron sometidas a diferentes niveles de presión de confinamiento, y el confinamiento pasivo fue a través de tubos de acero y polímeros reforzados de fibra (FRP). En estos casos el nivel de confinamiento fue condicionado por los espesores de tubo de acero y número de capas de FRP empleados.

Los objetivos principales de este capítulo son comparar los resultados de los 3 sistemas de confinamiento estudiados, y analizar la influencia de los distintos tipos de confinamiento sobre el hormigón.

#### **6.2 EFECTOS DEL CONFINAMIENTO**

El hormigón experimenta un incremento en resistencia y capacidad de deformación cuando es sometido a confinamiento. Los resultados de los ensayos realizados con probetas cilíndricas confinadas por presión hidrostática, tubos de acero y polímeros reforzados con fibra (FRP), presentados en los capítulos anteriores, muestran el comportamiento característico de cada sistema de confinamiento. Las Figuras 6.1 a 6.6 presentan una comparación entre las curvas tensión-deformación de estos sistemas de confinamiento estudiados. Las Figuras 6.1 y 6.2

corresponden al hormigón de baja resistencia, mientras que las Figuras 6.3 a 6.6 corresponden al hormigón de alta resistencia. En todas las figuras las tensiones y deformaciones han sido normalizadas con respecto a la resistencia a compresión y deformación axial del hormigón sin confinar. Las comparaciones se hicieron para valores de tensión de confinamiento comparables. A continuación se describen algunos aspectos de estas comparaciones.

Las Figuras 6.1 y 6.2 correspondientes al hormigón de baja resistencia confinado muestran valores comparables de la tensión máxima normalizada cuando las probetas son sometidas a confinamiento activo (en célula triaxial) y pasivo (en tubos de acero), mientras que los confinados con FRP muestran valores relativamente inferiores. Si consideramos el área bajo las curvas como un índice de la capacidad de absorción de energía, se podría decir que los tubos de acero son más efectivos en confinar el hormigón. Esto es más notorio en el caso del hormigón confinado con tubo de acero de 1.8 mm (Figura 6.1). Este diferente comportamiento puede atribuirse a que el tubo de acero llega a la plastificación, mas allá de la compactación del hormigón, con lo cual la curva tensión-deformación se estabiliza en un valor máximo, mientras que la probeta confinada dentro de la célula triaxial se sigue fisurando hasta la rotura total. Se observa también que, en todos los casos la tensión máxima normalizada es mayor para el caso de los hormigones confinados con FRP de carbono con respecto al FRP de vidrio, para el mismo número de capas.

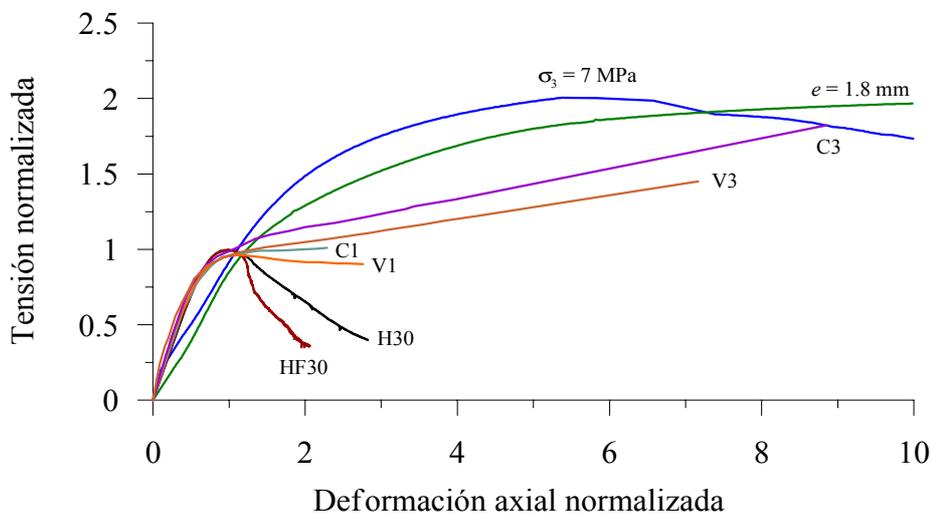


Figura 6.1 Curvas tensión-deformación axial normalizada del hormigón de baja resistencia, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 7$  MPa, con tubo de acero de  $e = 1.8$  mm ( $\sigma_3 = 7.2$  MPa), con 1 capa de FRP de vidrio (V1,  $\sigma_3 = 0.14$  MPa), 1 capa de FRP de carbono (C1,  $\sigma_3 = 2.8$  MPa), 3 capas de FRP de vidrio (V3,  $\sigma_3 = 6.3$  MPa) y 3 capas de FRP de carbono (C3,  $\sigma_3 = 8.8$  MPa)

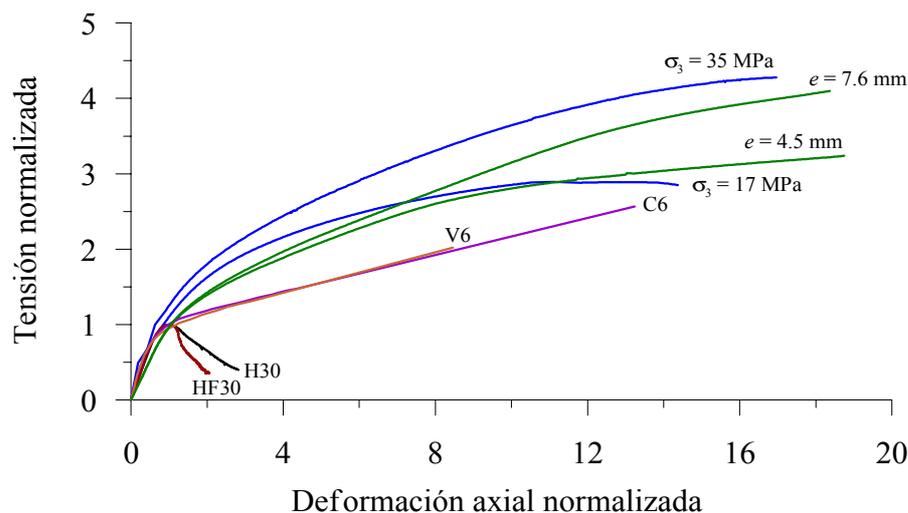


Figura 6.2 Curvas tensión-deformación axial normalizada del hormigón de baja resistencia, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 17\text{-}35$  MPa, con tubo de acero de  $e = 4.5$  mm ( $\sigma_3 = 17.8$  MPa),  $e = 7.6$  mm ( $\sigma_3 = 34.1$  MPa), con 6 capas de FRP de vidrio (V6,  $\sigma_3 = 11.1$  MPa) y con 6 capas de FRP de carbono (C6,  $\sigma_3 = 20.0$  MPa)

Las Figuras 6.3 a 6.6 presentan los resultados del hormigón de alta resistencia. Si comparamos los resultados del hormigón confinado por presión hidrostática y el hormigón confinado con tubos de acero, se puede decir que los resultados son bastante comparables. En el caso de los hormigones confinado con 3 capas de FRP de carbono los resultados son bastante aproximados a los confinados con tubo de acero y presión hidrostática como se muestra en la Figura 6.3. Para el caso de 3 capas de FRP de vidrio los resultados de tensión son menores debido al menor confinamiento. Sin embargo, para 6 ó más capas de FRP de carbono las tensiones normalizadas son mayores que los correspondientes valores del hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero, para tensiones de confinamiento similares, como se observa en las Figuras 6.4 a 6.6. Por ejemplo de la Figura 6.4 la tensión normalizada para el hormigón confinado con 6 capas de FRP de carbono (C6,  $\sigma_3 = 19.6$  MPa) es mayor que la tensión normalizada del hormigón confinado con tubo de acero de 4.5 mm ( $\sigma_3 = 18.5$  MPa). Sin embargo, es muy cercano a la tensión normalizada del hormigón confinado por presión hidrostática de 28 MPa. Del mismo modo de la Figura 6.5 la tensión normalizada para 9 capas de FRP de carbono (C9,  $\sigma_3 = 32.5$  MPa) es mayor que la tensión normalizada con tubo de acero de 7.6 mm ( $\sigma_3 = 34.0$  MPa), y similar al confinado por presión hidrostática de 50 MPa. Para 12 capas de confinamiento de FRP de carbono (C12,  $\sigma_3 = 32.4$  MPa), la tensión normalizada es mayor que el confinado por presión hidrostática de 50 MPa, como se muestra en la Figura 6.6. Esto podría explicarse debido al hecho de que la probeta ha sufrido una rigidización debido al elevado número de capas de confinamiento. En el caso del hormigón confinado con FRP de vidrio los resultados son inferiores a los del confinado con FRP de carbono, para el mismo número de capas.

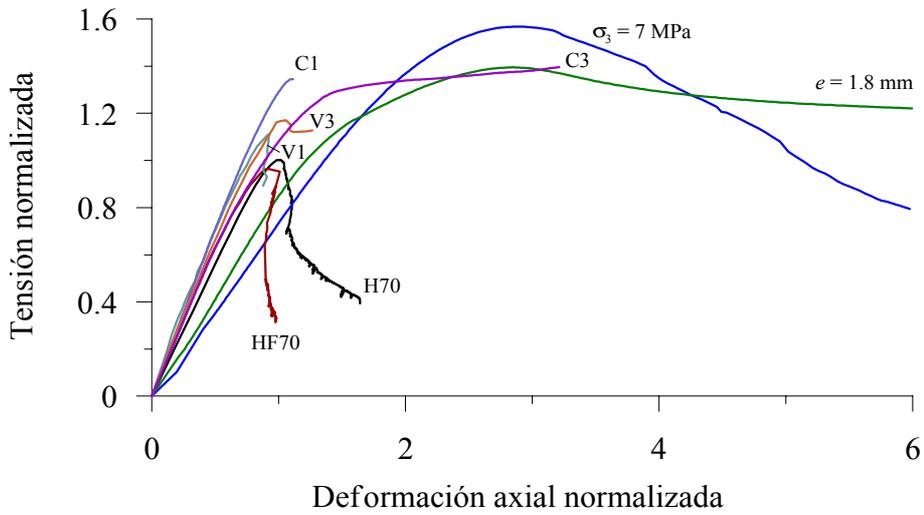


Figura 6.3 Curvas tensión-deformación axial normalizada del hormigón de alta resistencia, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 7$  MPa, con tubo de acero de  $e = 1.8$  mm ( $\sigma_3 = 6.2$  MPa), con 1 capa de FRP de vidrio (V1,  $\sigma_3 = 0.2$  MPa), 1 capa de FRP de carbono (C1,  $\sigma_3 = 0.3$  MPa), 3 capas de FRP de vidrio (V3,  $\sigma_3 = 1.0$  MPa) y 3 capas de FRP de carbono (C3,  $\sigma_3 = 7.8$  MPa)

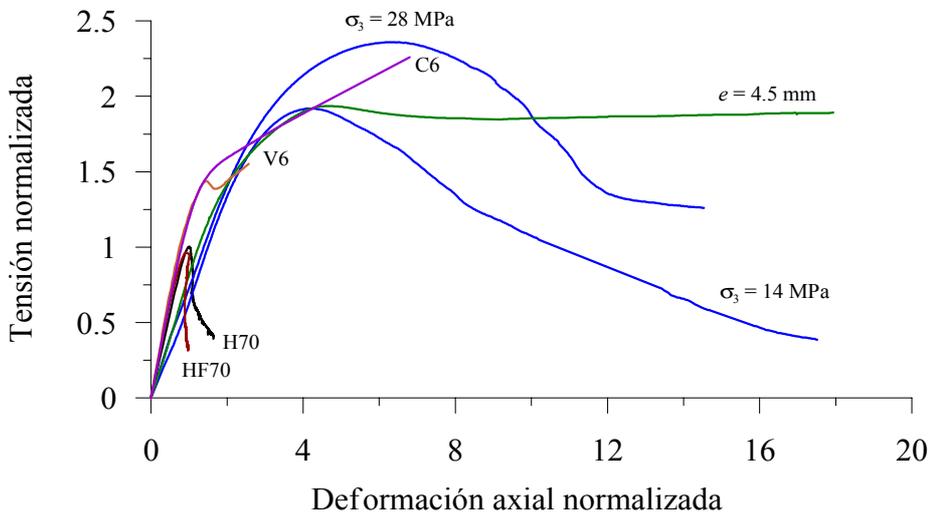


Figura 6.4 Curvas tensión-deformación axial normalizada del hormigón de alta resistencia, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 14-28$  MPa, con tubo de acero  $e = 4.5$  mm ( $\sigma_3 = 18.5$  MPa ), con 6 capas de FRP de vidrio (V6,  $\sigma_3 = 8.8$  MPa) y con 6 capas de FRP de carbono (C6,  $\sigma_3 = 19.6$  MPa)

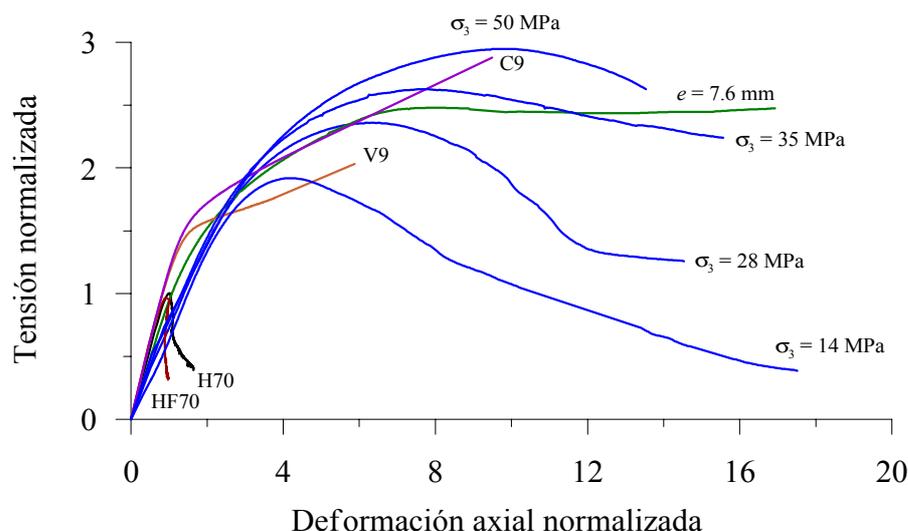


Figura 6.5 Curvas tensión-deformación axial normalizada del hormigón de alta resistencia, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 28-35-50$  MPa, con tubo de acero de  $e = 7.6$  mm ( $\sigma_3 = 34.0$  MPa ), con 9 capas de FRP de vidrio (V9,  $\sigma_3 = 14.3$  MPa) y con 9 capas de FRP de carbono (C9,  $\sigma_3 = 32.5$  MPa)

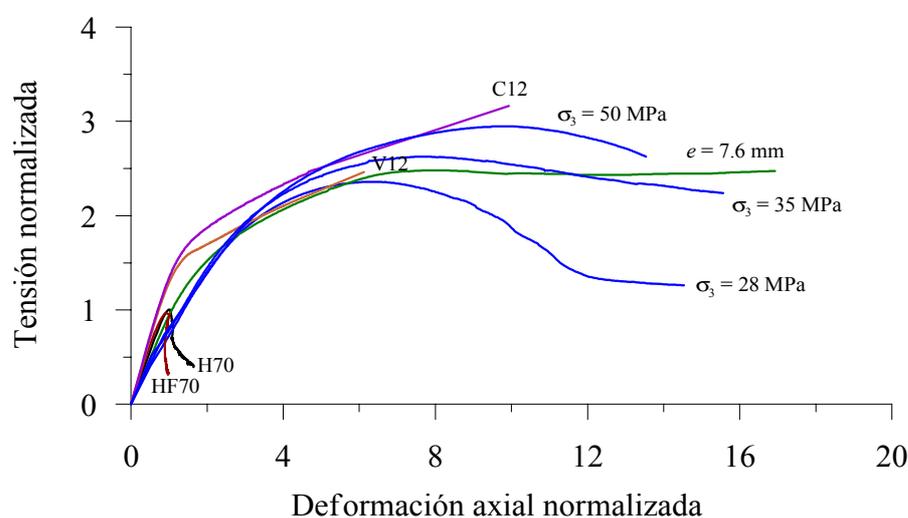


Figura 6.6 Curvas tensión-deformación axial normalizada del hormigón de alta resistencia, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 28-35-50$  MPa, con tubo de acero de  $e = 7.6$  mm ( $\sigma_3 = 34.0$  MPa ), con 12 capas de FRP de vidrio (V12,  $\sigma_3 = 21.7$  MPa) y con 12 capas de FRP de carbono (C12,  $\sigma_3 = 32.4$  MPa)

También se ha relacionado la tensión máxima alcanzada con las tensiones de confinamiento debido a la presión hidrostática, los tubos de acero y los polímeros reforzados con fibra (FRP). Estas relaciones se muestran en las Figuras 6.7 y 6.8, donde las tensiones de confinamiento ejercidas por los tubos de acero y capas de FRP son las determinadas experimentalmente (Ver Tabla 4.4 del Capítulo 4 y Tabla 5.6 del Capítulo 5). La Figura 6.7 corresponde al hormigón de baja resistencia y la Figura 6.8 al hormigón de alta resistencia. En estas figuras,  $\sigma_3$  es la presión hidrostática de confinamiento,  $e$  es el espesor del tubo de acero y 1c, 3c, 6c, 9c y 12c es el número de capas de FRP empleados. Además, los hormigones confinados con FRP de carbono y vidrio están identificados como HFC y HFV, respectivamente.

De la Figura 6.7 del hormigón de baja resistencia se puede decir que los resultados de tensión máxima alcanzada mediante el confinamiento en la célula triaxial, tubo de acero y FRP son muy semejantes. Es evidente que al incrementar la tensión de confinamiento se incremente la tensión máxima. Sin embargo, se puede destacar que para 1 capa de confinamiento el incremento en resistencia no es muy significativo, independientemente del tipo de FRP.

En el caso del hormigón de alta resistencia (Figura 6.8) los valores de tensión máxima para el hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero siguen la misma tendencia. Sin embargo, para los confinados con FRP solo son comparables para bajas tensiones de confinamiento, del orden de 10 MPa. Igualmente la tensión máxima se incrementa cuando se alcanzan mayores valores de tensión de confinamiento.

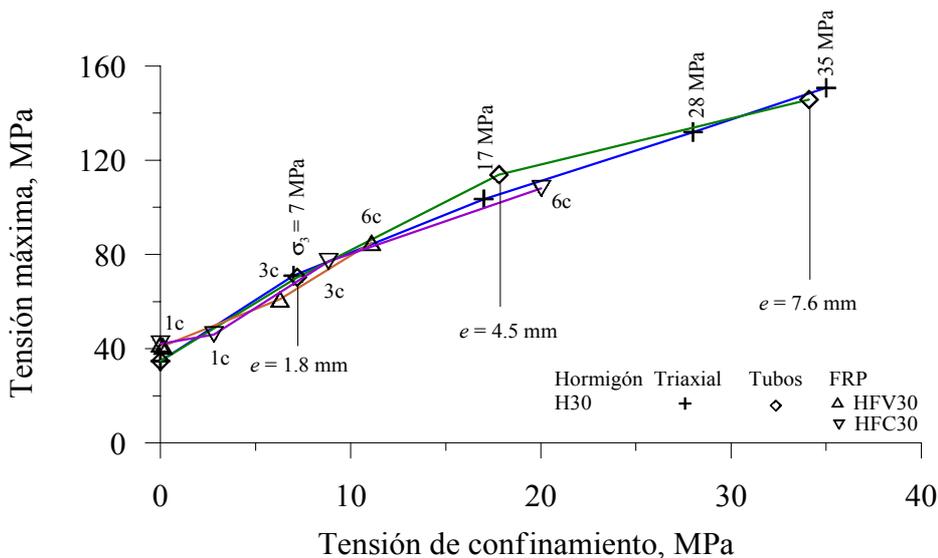


Figura 6.7 Relación entre la tensión máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón de baja resistencia

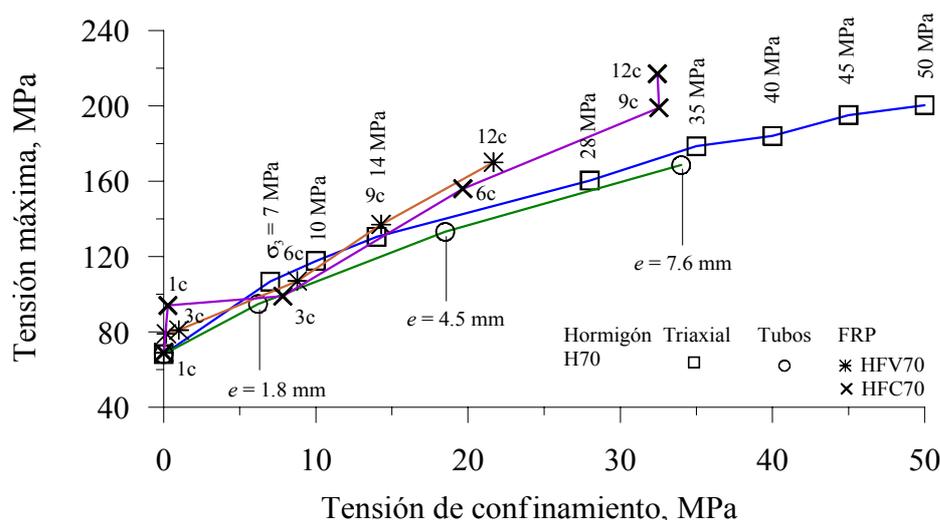


Figura 6.8 Relación entre la tensión máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón de alta resistencia

Además, se pueden relacionar las máximas tensiones alcanzadas con las tensiones de confinamiento a la que fueron sometidos los hormigones. Para esto las máximas tensiones alcanzadas y las tensiones de confinamiento aplicadas han sido normalizadas con respecto a la resistencia a compresión del hormigón sin confinar. De esta manera las Figuras 6.9 y 6.10 presentan las relaciones entre el índice de tensión máxima, definido como  $(f'_{c_{max}}/f'_c)$  y el nivel de confinamiento, definido como  $(\sigma_3/f'_c)$  para el hormigón de baja y alta resistencia, respectivamente.

De la Figura 6.9 correspondiente al hormigón de baja resistencia se puede decir que la tendencia del índice de tensión máxima del hormigón confinado con tubo de acero, del hormigón confinado por presión hidrostática y el confinado con FRP son similares. Sin embargo, los índices de tensión máxima de los hormigones confinados con FRP son menores cuando se comparan niveles de confinamiento similares.

En el caso del hormigón de alta resistencia que se muestra en la Figura 6.10 la tendencia es similar para los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero. En el caso de los hormigones confinados con FRP los índices de tensión máxima son aproximadamente iguales a los índices de los hormigones confinados con tubo de acero y presión hidrostática hasta un nivel de confinamiento de 0.2. Mas allá de este valor el índice para el hormigón confinado con FRP es mayor que aquellos de los hormigones confinados con tubo de acero y presión hidrostática. Este comportamiento es diferente al observado en el hormigón de baja resistencia. Parece que en el hormigón de alta resistencia se produce una rigidización para niveles de confinamiento mayores a 0.20.

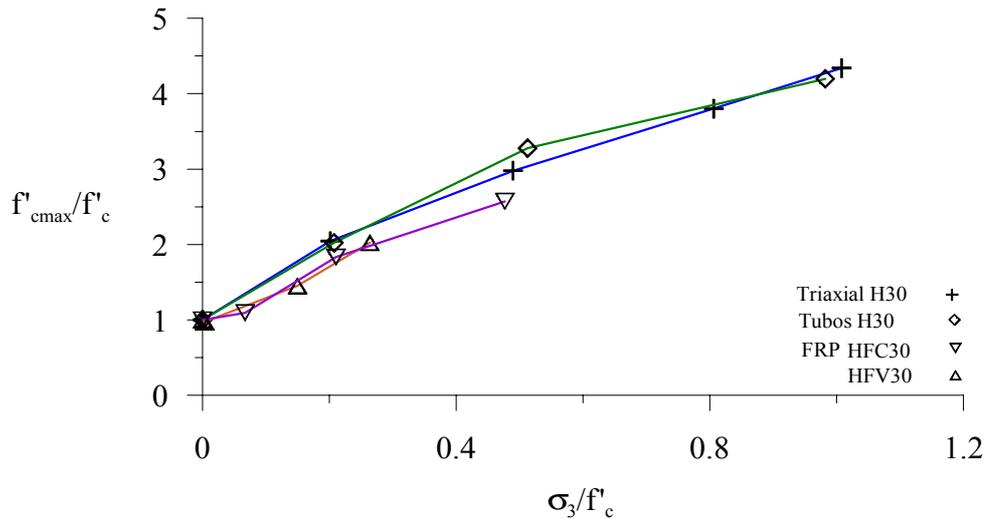


Figura 6.9 Relación entre el índice de tensión máxima y el nivel de confinamiento para el hormigón de baja resistencia

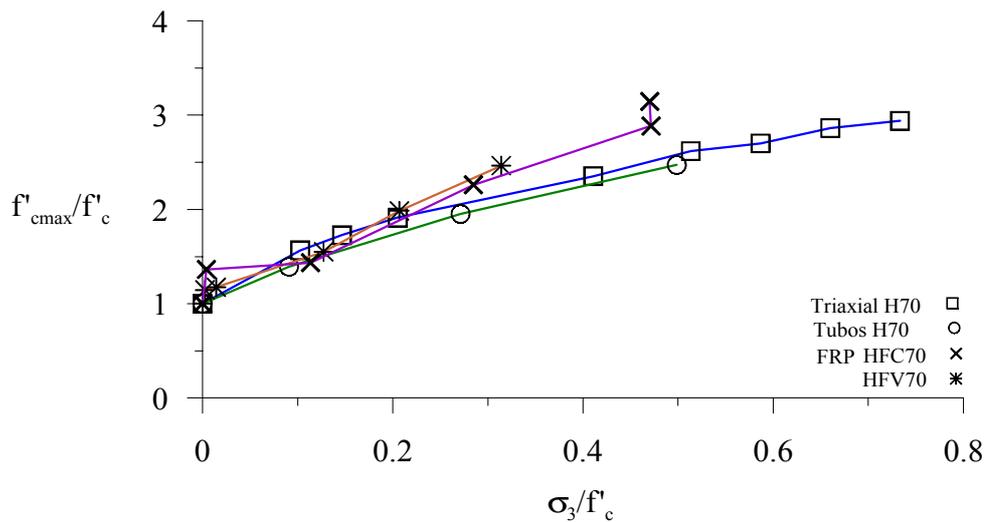


Figura 6.10 Relación entre el índice de tensión máxima y el nivel de confinamiento para el hormigón de alta resistencia

Respecto a las deformaciones las Figuras 6.11 a 6.14 muestran una comparación entre las máximas deformaciones registradas en función de la tensión de confinamiento. Las Figuras 6.11 y 6.12 muestran la relación entre las máximas deformaciones y las tensiones de confinamiento para los hormigones de baja y alta resistencia, respectivamente, mientras que las Figuras 6.13 y 6.14 muestran la relación entre el índice de deformación y el nivel de confinamiento de los hormigones de baja y alta resistencia, respectivamente. Para este último caso los valores de deformación y tensión de confinamiento fueron normalizados con respecto a la resistencia del hormigón sin confinar.

Para el hormigón de baja resistencia confinado con tubo de acero se observa un rápido incremento de la deformación, pero a medida que se incrementa el espesor la deformación parece estabilizarse en un valor máximo (Ver Figura 6.11). En el caso del hormigón confinado por presión hidrostática la deformación se incrementa con el incremento del confinamiento. Similares tendencias se observan para los hormigones confinados con FRP de carbono y vidrio. Los máximos valores de deformación de los hormigones confinados con el mayor espesor de tubo de acero y con el mayor número de capas de FRP parecen ser iguales a las correspondientes máximas deformaciones del hormigón confinado por presión hidrostática.

En el caso del hormigón de alta resistencia, se observan valores muy similares de deformación registrada para los casos de los hormigones confinados con tubos de acero y presión hidrostática (Ver Figura 6.12) y se va incrementando en función del mayor confinamiento. En el caso del hormigón confinado con FRP de vidrio la deformación igualmente se incrementa con el incremento del número de capas de confinamiento, sin embargo, para el confinado con FRP de carbono la deformación incrementa hasta un cierto valor, después del cual se estabiliza. Las máximas deformaciones de los hormigones confinados con el mayor número de capas de FRP son mayores (para las mismas tensiones de confinamiento) que las máximas deformaciones en los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero.

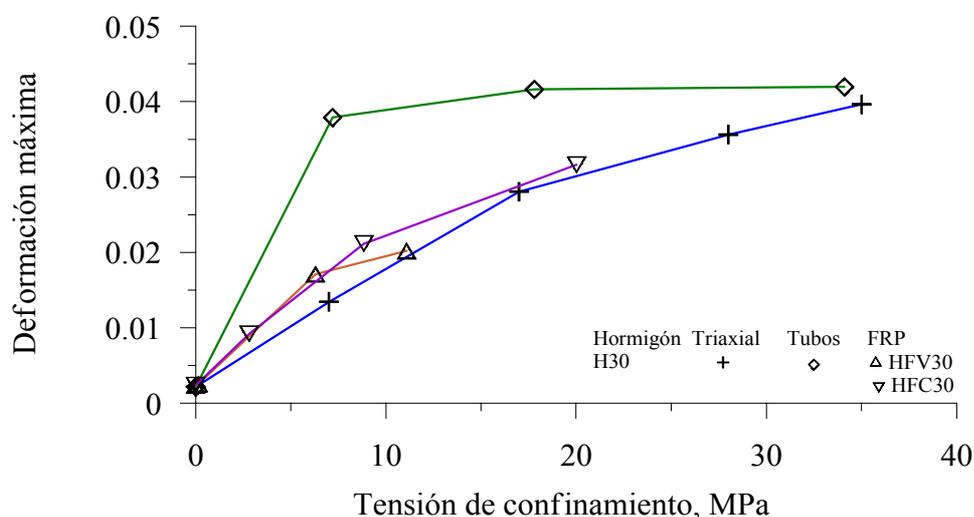


Figura 6.11 Relación entre la deformación máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón de baja resistencia

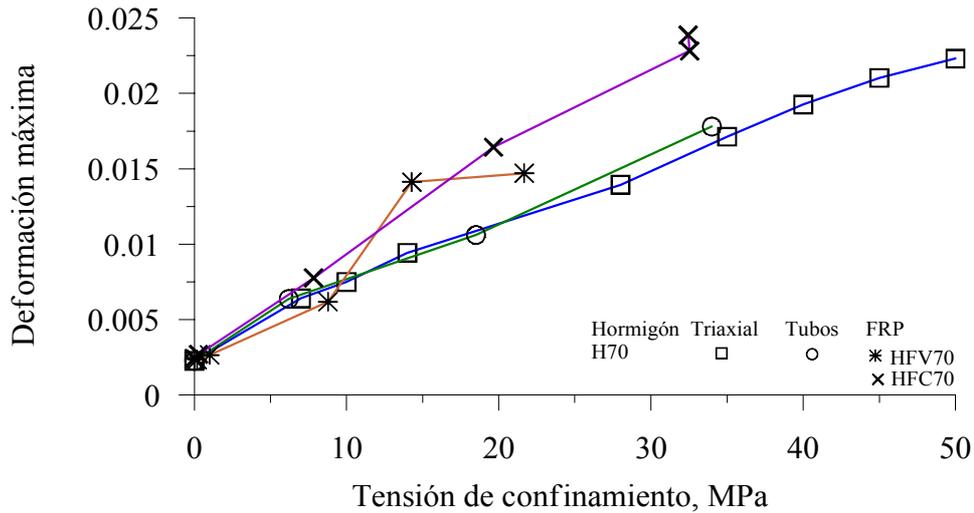


Figura 6.12 Relación entre la deformación máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón de alta resistencia

Las mismas tendencias se observan en las Figuras 6.13 y 6.14. Sin embargo, las gráficas también muestran que para el mismo nivel de confinamiento se obtiene valores distintos del índice de deformación. En el caso del hormigón de baja resistencia se alcanzaron mayores valores para el índice de deformación comparado con aquellos del hormigón de alta resistencia, lo que indica que la influencia del confinamiento es mayor para el hormigón de baja resistencia.

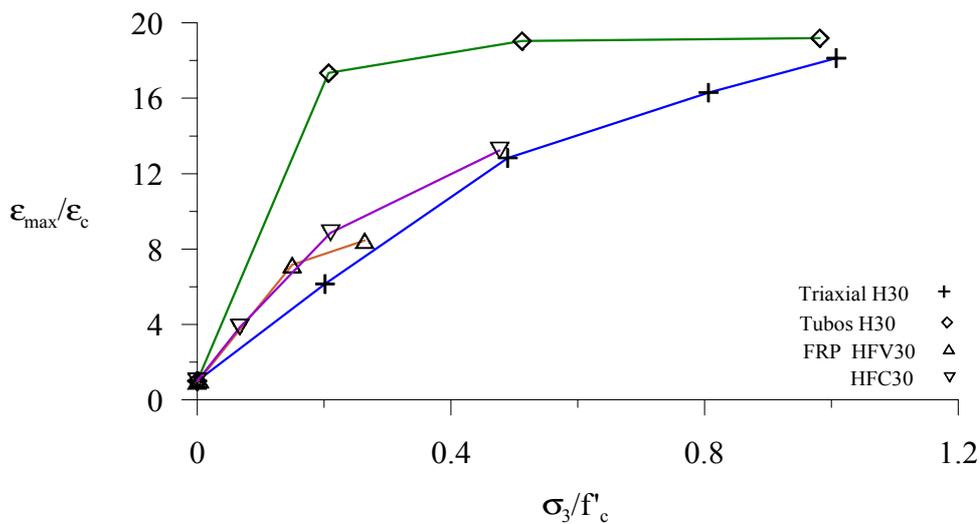


Figura 6.13 Relación entre el índice de deformación y el nivel de confinamiento para el hormigón de baja resistencia

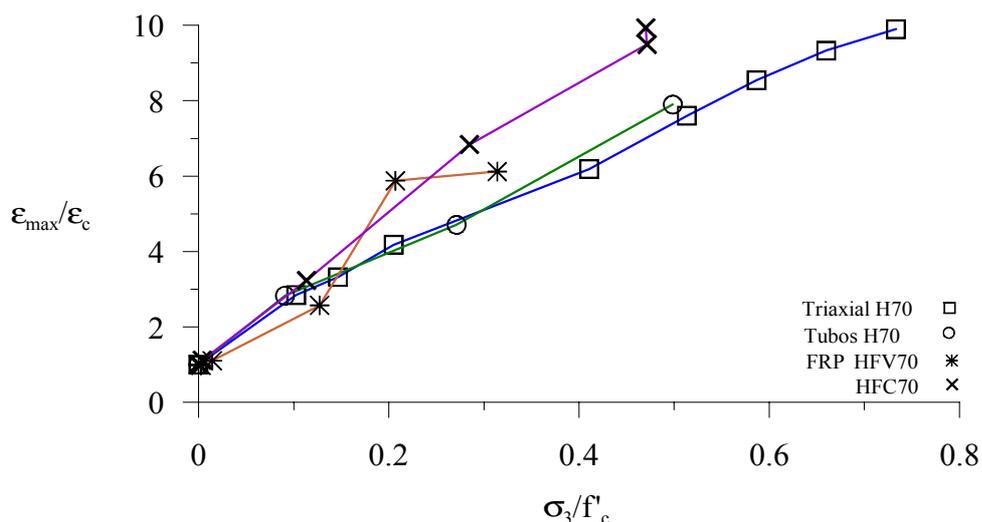


Figura 6.14 Relación entre el índice de deformación y el nivel de confinamiento para el hormigón de alta resistencia

Para hacer una comparación cuantitativa las Tablas 6.1 y Tabla 6.2 muestran un resumen de los resultados obtenidos. La Tabla 6.1 muestra los resultados del hormigón de baja resistencia y la Tabla 6.2 los resultados del hormigón de alta resistencia. Es evidente el diferente efecto del confinamiento de los sistemas de confinamiento estudiados. A continuación se describen algunos aspectos de las tablas.

En el hormigón de baja resistencia el incremento de la tensión es bastante similar cuando las probetas son sometidas a confinamiento por presión hidrostática y tubos de acero (Tabla 6.1). Por ejemplo si comparamos las tensiones máximas para el nivel de confinamiento ( $\sigma_3/f'_c$ ) del orden de 0.20 la tensión máxima se incrementa en 2 veces la resistencia del hormigón sin confinar, para el hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero, mientras que para el hormigón confinado con FRP de carbono se incrementa en 1.8 veces. Para duplicar la tensión máxima en el hormigón confinado con FRP de vidrio es necesario un nivel de confinamiento de 0.26. Es decir, se necesitan 6 capas de FRP de vidrio para duplicar la resistencia del hormigón sin confinar, mientras que en el confinado con FRP de carbono solo se necesitan 3 capas de FRP. Por otro lado para ( $\sigma_3/f'_c$ ) cercano a 0.50 la tensión máxima se incrementa en aproximadamente 3 veces para el hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero, mientras que para el hormigón confinado con FRP de carbono se incrementa en 2.6 veces la tensión. También para ( $\sigma_3/f'_c$ ) igual a 1 la tensión máxima del hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero se incrementa en 4 veces la resistencia del hormigón sin confinar. Con respecto a las máximas deformaciones los resultados son variables. Hay un incremento gradual de la deformación para el hormigón confinado por presión hidrostática en función del incremento del confinamiento, mientras que los confinados

con tubo de acero presentan un rápido incremento de la deformación para espesores menores ( $e = 1.8 \text{ mm}$ ), y parece estabilizarse para el mayor espesor. Para  $(\sigma_3/f'_c)$  cercano a 0.20 la deformación máxima del hormigón confinado por presión hidrostática se incrementa en 6 veces la deformación del hormigón sin confinar, mientras que para el tubo de acero se incrementa en 17 veces y para el hormigón confinado con FRP de carbono se incrementa casi 9 veces. Para  $(\sigma_3/f'_c)$  cercano a 0.50 la deformación máxima se incrementa 13 veces en el hormigón confinado por presión hidrostática y confinado con FRP de carbono y 19 veces en el hormigón confinado con tubo de acero. Para  $(\sigma_3/f'_c)$  igual a 1 la deformación máxima se incrementa en 18 veces para el hormigón confinado por presión hidrostática y en 19 veces para el hormigón confinado con tubo de acero. En general, se observa una tendencia a mayores valores de tensión máxima cuando el hormigón es confinado por presión hidrostática y tubo de acero.

Tabla 6.1 Resultados de los ensayos de hormigón confinado-Baja resistencia

Serie	Espesor/ Capas	$\sigma_3$ MPa	$\sigma_3/f'_c$	$f'_{c\max}$ MPa	$f'_{c\max}/f'_c$	$\epsilon_{\max}$ $\mu\epsilon$	$\epsilon_{\max}/\epsilon_c$
Presión hidrostática							
H30	-	0	0	35	1.0	2190	1.0
	-	7	0.20	71	2.0	13440	6.1
	-	17	0.49	103	2.9	28040	12.8
	-	28	0.80	132	3.8	35620	16.3
	-	35	1.00	151	4.3	39620	18.1
Tubos de acero							
H30	0	0	0	35	1.0	2190	1.0
	1.8	7.2	0.21	70	2.0	37890	17.3
	4.5	17.8	0.51	114	3.3	41610	19.0
	7.6	34.0	0.98	146	4.2	41950	19.2
Polímeros reforzados con fibra (FRP)							
FRPV							
HFV30	0	0	0	42	1.0	2390	1.0
	1	0.1	0.00	41	1.0	2530	1.1
	3	6.3	0.15	61	1.5	17120	7.2
	6	11.1	0.26	85	2.0	20190	8.4
FRPC							
HFC30	0	0	0	42	1.0	2390	1.0
	1	2.8	0.07	46	1.1	9200	3.8
	3	8.8	0.21	77	1.8	20160	8.8
	6	20.0	0.48	108	2.6	31620	13.2

Tabla 6.2 Resultados de los ensayos de hormigón confinado-Alta resistencia

Serie	Espesor/ Capas	$\sigma_3$ MPa	$\sigma_3/f'_c$	$f'_{c\max}$ MPa	$f'_{c\max}/f'_c$	$\epsilon_{\max}$ $\mu\epsilon$	$\epsilon_{\max}/\epsilon_c$
Presión hidrostática							
H70	-	0	0	68	1.0	2250	1.0
	-	7	0.10	107	1.6	6410	2.8
	-	10	0.15	118	1.7	7490	3.3
	-	14	0.20	130	1.9	9430	4.2
	-	28	0.41	160	2.3	13940	6.2
	-	35	0.51	178	2.6	17130	7.6
	-	40	0.59	184	2.7	19250	8.5
	-	45	0.66	195	2.9	21030	9.3
	-	50	0.73	200	2.9	22310	9.9
Tubos de acero							
H70	0	0	0	68	1.0	2250	1.0
	1.8	6.2	0.10	95	1.4	6370	2.8
	4.5	18.5	0.27	133	1.9	10610	4.7
	7.6	34.0	0.50	168	2.5	17800	7.9
Polímeros reforzados con fibra (FRP)							
HFV70	0	0	0	69	1.0	2400	1.0
	1	0.2	0.00	79	1.1	2350	1.0
	3	1.0	0.01	83	1.2	2650	1.1
	6	8.8	0.13	107	1.4	6180	2.6
	9	14.3	0.21	140	2.0	14120	5.9
	12	21.7	0.31	170	2.5	14710	6.1
FRPC							
HFC70	0	0	0	69	1.0	2400	1.0
	1	0.3	0.00	94	1.3	2690	1.1
	3	7.8	0.11	98	1.4	7760	3.2
	6	19.6	0.28	156	2.3	16340	6.8
	9	32.5	0.47	199	2.9	22810	9.5
	12	32.4	0.47	217	3.1	23870	9.9

En el caso del hormigón de alta resistencia el incremento de la resistencia es igualmente similar para el caso del hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero, hasta los niveles de confinamiento comparables, como se aprecia en la Tabla 6.2. En el caso de los hormigones confinados con FRP los incrementos en la tensión máxima solo son comparables hasta valores de nivel de confinamiento de orden de 0.20, como se puede apreciar de la Tabla 6.2 y Figura 6.10. Por ejemplo si comparamos los resultados para el nivel de confinamiento

del orden de 0.10 la tensión máxima se incrementa en 1.6 veces la tensión del hormigón sin confinar para el caso del hormigón confinado por presión hidrostática, y 1.4 veces para los hormigones confinados con tubo de acero y FRP de vidrio y carbono. Para  $(\sigma_3/f'_c)$  cercano a 0.50 el incremento de la tensión máxima es del orden de 2.5 veces para los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero, mientras que para el confinado con FRP de carbono es aproximadamente 3 veces. Parece que el elevado número de capas de FRP rigidiza el hormigón con lo cual se alcanzan altas tensiones. Con respecto al incremento de las máximas deformaciones se encontraron valores similares para los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero. Por ejemplo para  $(\sigma_3/f'_c)$  igual a 0.10 la deformación máxima de los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero se incrementa en 2.8 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar, mientras que para el confinado con FRP de vidrio se incrementa en 2.6 veces y 3.2 veces para el confinado con FRP de carbono. Para  $(\sigma_3/f'_c)$  del orden de 0.50 la deformación máxima se incrementa 7.6 veces para el hormigón confinado por presión hidrostática, 7.9 veces para el confinado con tubo de acero, y más de 9.5 veces para el confinado con FRP de carbono.

### 6.3 HORMIGÓN CONFINADO POR PRESIÓN HIDROSTÁTICA Y TUBO DE ACERO

Como se mencionó anteriormente los resultados de tensión máxima alcanzada en las probetas confinadas por presión hidrostática y tubos de acero son bastante comparables. Las Figuras 6.15 a 6.17 muestran las curvas tensión-deformación axial de los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero. En general las curvas tensión-deformación axial del hormigón confinado por presión hidrostática presentan formas similares, con un tramo inicial ascendente hasta alcanzar el valor máximo de la tensión luego del cual sigue un segundo tramo descendente. En el caso del hormigón confinado con tubo de acero parece ser que a medida que se incrementa el espesor del tubo de acero, la curva no presenta parte descendente, por el contrario se estabiliza en el valor máximo de la tensión alcanzada.

La Figura 6.15 correspondiente al hormigón de baja resistencia H30 muestra que las tensiones máximas alcanzadas son similares. Para el hormigón confinado por presiones hidrostáticas de 7 MPa, 17 MPa y 35 MPa las tensiones máximas fueron de 71 MPa, 103 MPa y 151 MPa, respectivamente, mientras que para el hormigón confinado con tubos de acero de 1.8 mm ( $\sigma_3 = 7.2$  MPa), 4.5 mm ( $\sigma_3 = 17.8$  MPa) y 7.6 mm ( $\sigma_3 = 34.1$  MPa) de espesor las tensiones máximas fueron de 70 MPa, 114 MPa y 146 MPa, respectivamente.

De la misma manera, para los hormigones de alta resistencia H70 y HE70 confinadas por presión hidrostática y tubo de acero las tensiones máximas alcanzadas son similares, como se muestra en las Figuras 6.16 y 6.17. Para el hormigón H70 confinado por presiones hidrostáticas de 7 MPa, 14 MPa y 35 MPa las tensiones máximas fueron de 107 MPa, 130

MPa y 178 MPa, respectivamente, mientras que para el hormigón confinado con tubos de acero de 1.8 mm ( $\sigma_3 = 6.2$  MPa), 4.5 mm ( $\sigma_3 = 18.5$  MPa) y 7.6 mm ( $\sigma_3 = 34.0$  MPa) de espesor las tensiones máximas fueron de 95 MPa, 133 MPa y 168 MPa, respectivamente. Para las mismas presiones hidrostáticas de confinamiento las tensiones máximas en el hormigón HE70 fueron de 107 MPa, 135 MPa y 184 MPa, mientras que para el hormigón confinado con tubos de acero de 1.8 mm ( $\sigma_3 = 6.7$  MPa), 4.5 mm ( $\sigma_3 = 19.2$  MPa) y 7.6 mm ( $\sigma_3 = 26.9$  MPa) de espesor las tensiones máximas fueron de 104 MPa, 140 MPa y 176 MPa, respectivamente.

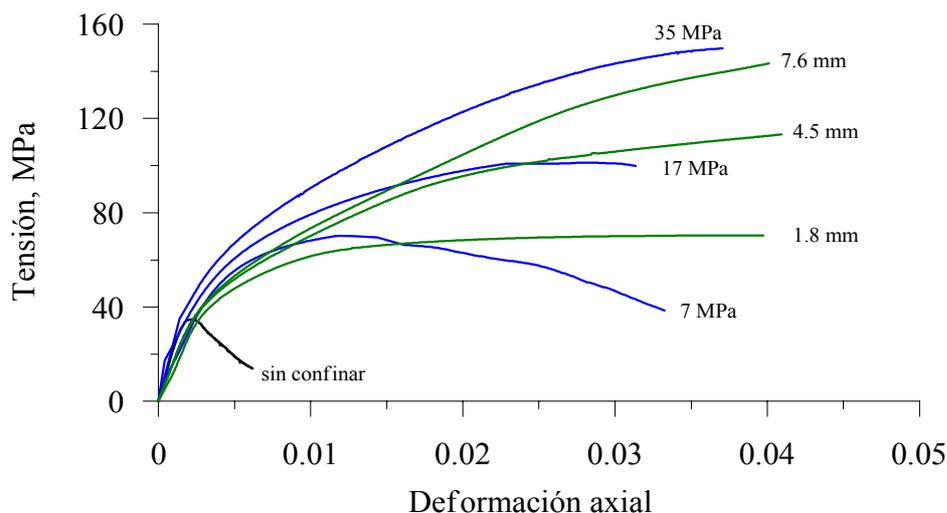


Figura 6.15 Curvas tensión-deformación axial del hormigón de baja resistencia H30, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 7-17-35$  MPa, y con tubo de acero de  $e = 1.8$  mm ( $\sigma_3 = 7.2$  MPa),  $e = 4.5$  mm ( $\sigma_3 = 17.8$  MPa) y  $e = 7.6$  mm ( $\sigma_3 = 34.1$  MPa)

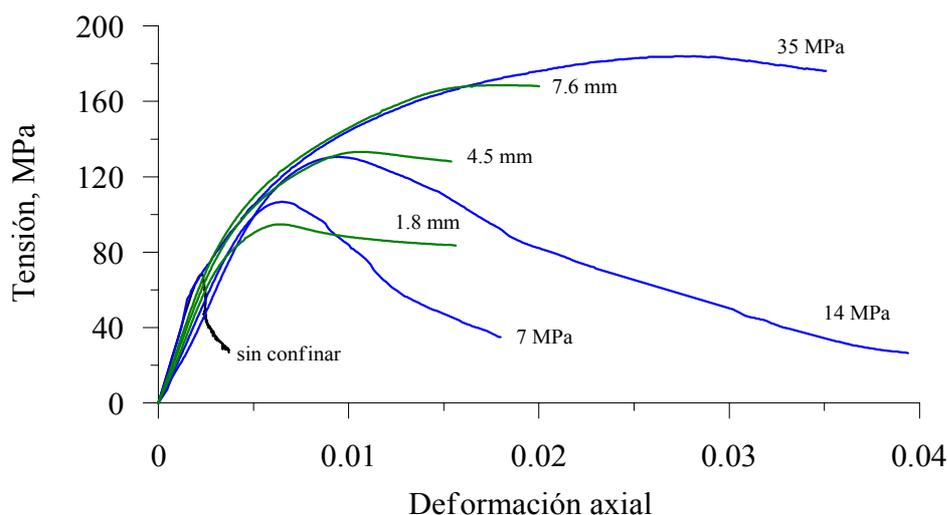


Figura 6.16 Curvas tensión-deformación axial del hormigón de alta resistencia H70, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 7-14-35$  MPa, y con tubo de acero de  $e = 1.8$  mm ( $\sigma_3 = 6.2$  MPa),  $e = 4.5$  mm ( $\sigma_3 = 18.5$  MPa) y  $e = 7.6$  mm ( $\sigma_3 = 34.0$  MPa)

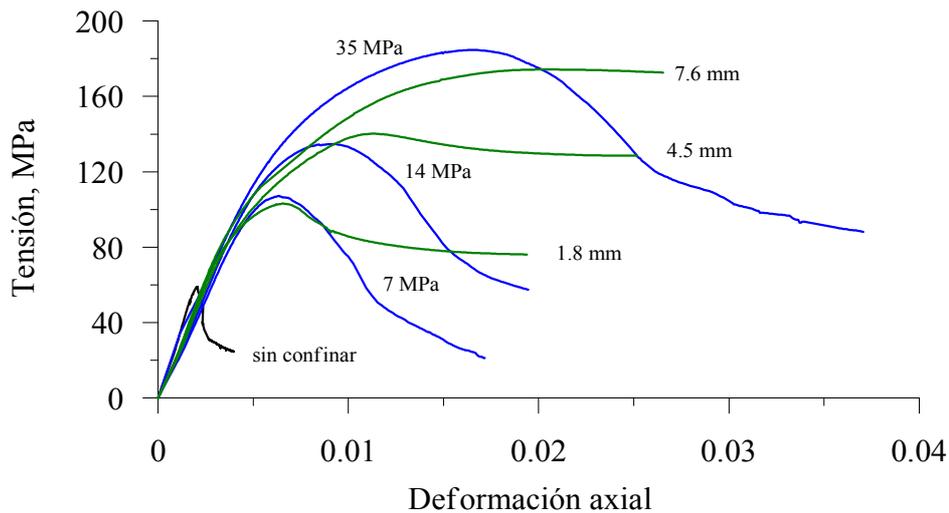


Figura 6.17 Curvas tensión-deformación axial del hormigón de alta resistencia HE70, confinado por presión hidrostática  $\sigma_3 = 7-14-35$  MPa, y con tubo de acero de  $e = 1.8$  mm ( $\sigma_3 = 6.7$  MPa),  $e = 4.5$  mm ( $\sigma_3 = 19.2$  MPa) y  $e = 7.6$  mm ( $\sigma_3 = 26.9$  MPa)

## 6.4 MODELIZACIÓN DEL EFECTO DEL CONFINAMIENTO

### 6.4.1 Antecedentes

Durante los últimos años se han publicado numerosos trabajos teóricos y analíticos que permiten predecir el comportamiento del hormigón en condiciones de confinamiento. Tradicionalmente, estos modelos han sido basados en la hipótesis de presión de confinamiento constante. Esta hipótesis no es válida cuando el confinamiento se hace mediante una acción pasiva, como la generación del confinamiento con acero de refuerzo convencional, en forma de estribos o espirales. En una manera semejante, cuando se usan materiales de elevada rigidez, la presión de confinamiento es variable. Tal es el caso de los materiales compuestos (FRP) y tubos de acero, cuando se usan como materiales de confinamiento en forma de encamisados. En estos casos, el confinamiento depende de la deformación transversal del hormigón, el cual es dependiente de la carga axial y la rigidez del confinamiento.

Entre los primeros trabajos sobre el hormigón confinado están los de Richart et al. (1928), quienes investigaron el comportamiento del hormigón en compresión biaxial y triaxial mediante ensayos a compresión en probetas cilíndricas de hormigón sometidos a presión hidrostática de confinamiento. El modelo del comportamiento del hormigón confinado propuesto por Richart et al. (1928) ha sido empíricamente modificado por otros investigadores (Newman y Newman, 1971; Cusson y Paultre, 1995). Además, se han propuesto cierto número de modelos constitutivos del comportamiento del hormigón sometido a carga biaxial y triaxial.

Por otro lado, se ha realizado una extensa investigación para columnas de hormigón reforzadas con acero y con los resultados de estos ensayos se han propuesto modelos del comportamiento del hormigón confinado. El modelo más comúnmente usado es el propuesto por Mander et al. (1988). Además, Ahmad y Shah (1982), y Madas y Elnashai (1992) encontraron que el hormigón sometido a confinamiento pasivo (confinamiento convencional) es dependiente de la dilatación del hormigón. Ahmad y Shah (1982) propusieron un método iterativo para determinar el comportamiento tensión-deformación para confinamiento pasivo, sin embargo el método es demasiado laborioso y complicado. Madas y Elnashai (1992) propusieron un modelo para confinamiento pasivo que determina la relación entre las deformaciones axiales y transversales. Este modelo usa a su vez el modelo para el comportamiento de la dilatación del hormigón propuesto por Elwy y Murray (1979). Asimismo, Spoelstra y Monti (1999) han propuesto un modelo para el comportamiento del hormigón teniendo como variable el nivel de confinamiento similar al utilizado por Madas y Elnashai (1992). El modelo de Spoelstra y Monti (1999) usa el modelo de confinamiento constante propuesto por Mander et al. (1988) y el modelo para la dilatación del hormigón sin confinar propuesto por Pantazopoulou y Mills (1995).

En general, la mayoría de los modelos existentes han sido desarrollados para describir los efectos del confinamiento en hormigón armado o encamisados que asumen que la presión lateral actuante en el instante que el hormigón alcanza la carga máxima puede ser determinada asumiendo que la armadura transversal, o un encamisado, está sometida a la tensión máxima del material de confinamiento (es decir, tensión de fluencia y tensión de tracción, para el encamisado de acero y FRP). Sin embargo, esta hipótesis puede llevar a resultados inadecuados cuando, por ejemplo, se utilizan elementos de confinamiento de alta rigidez (Cusson y Paultre, 1999; Razvi y Saatcioglu, 1999; Spoelstra y Monti, 1999). En este sentido, es importante que el modelo incorpore procedimientos que permita evaluar las presiones laterales producidas por los elementos de confinamiento para cada nivel de deformación axial.

El presente estudio presenta un análisis comparativo entre los resultados experimentales y dos modelos existentes en la literatura. Para el caso del hormigón confinado por presión hidrostática se ha empleado el modelo de Sargin (1971), mientras que para el confinado con tubos de acero y materiales compuestos (FRP) se empleó el modelo de Marques y Marques (2000).

El modelo de Marques y Marques (2000) es un modelo analítico aplicable a hormigón confinado con tubo de acero y FRP que se basa en los modelos de Razvi y Saatcioglu (1999) y Mander et al. (1988) y permite obtener la respuesta tensión-deformación del hormigón confinado para cada valor de presión de confinamiento lateral. El modelo se basa en la idea de que la rigidez axial del hormigón confinado y sin confinar está directamente relacionada con la deformación lateral. A continuación se describen aspectos generales de los modelos utilizados y los resultados obtenidos.

### 6.4.2 Modelo para hormigón confinado por presión hidrostática

Numerosas ecuaciones han sido propuestas para representar el comportamiento tensión-deformación del hormigón. Sin embargo, existe poca información sobre la curva tensión-deformación axial del hormigón sometido a compresión triaxial.

El presente estudio emplea un modelo analítico propuesto por Sargin (1971) para determinar el comportamiento tensión-deformación del hormigón sometido a compresión triaxial (parte ascendente y descendente). Los parámetros necesarios para establecer la completa relación tensión-deformación son la tensión máxima, su correspondiente deformación, módulo de elasticidad, tensión y deformación en el punto de inflexión de la parte descendente de la curva. A continuación se describe brevemente algunos aspectos del modelo y parámetros para el cálculo de las curvas tensión-deformación.

Sargin (1971) propuso el siguiente modelo matemático para describir el comportamiento tensión-deformación del hormigón aplicable al hormigón sin confinar y confinado:

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + CX + DX^2} \quad (6.1)$$

donde

$$Y = \frac{f}{f_o}, X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}, \forall X \geq 0, 0 \leq Y \leq 1 \quad (6.2)$$

Además,  $f$  es el valor de la tensión para la deformación  $\varepsilon$ , mientras que  $f_o$  es la tensión máxima y  $\varepsilon_o$  su correspondiente deformación. Se requieren además dos grupos diferentes de constantes ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ ) para la parte ascendente y descendente de la curva. Para la parte ascendente ( $\varepsilon \leq \varepsilon_o$ ) las constantes son (Attard y Setunge, 1996):

$$A = \frac{E_u \varepsilon_o}{f_o} \quad (6.3)$$

$$B = \frac{(A-1)^2}{\alpha \left(1 - \frac{f_{pl}}{f_o}\right)} + \frac{A^2(1-\alpha)}{\alpha^2 \frac{f_{pl}}{f_o} \left(1 - \frac{f_{pl}}{f_o}\right)} - 1 \quad (6.4)$$

$$C = (A-2), D = (B+1) \quad (6.5)$$

En las expresiones anteriores  $E_{ii}$  es el módulo inicial y  $f_{pl}$  es la tensión correspondiente al cálculo del módulo secante (generalmente,  $f_{pl} = 0.45f_c$ ). El módulo inicial se asume que varía linealmente entre  $1.17E_c$  y  $E_c$  para hormigón de 20 y 100 MPa, respectivamente. Además,  $\alpha = E_{ii}/E_{tc}$ . Es posible una simplificación de la constante  $B$ , haciendo  $\alpha$  igual a uno.

Para la parte descendente ( $\varepsilon \geq \varepsilon_o$ ) es necesario definir dos puntos de inflexión sobre el tramo descendente de la curva tensión-deformación. Estos puntos se ilustran en la Figura 6.18.

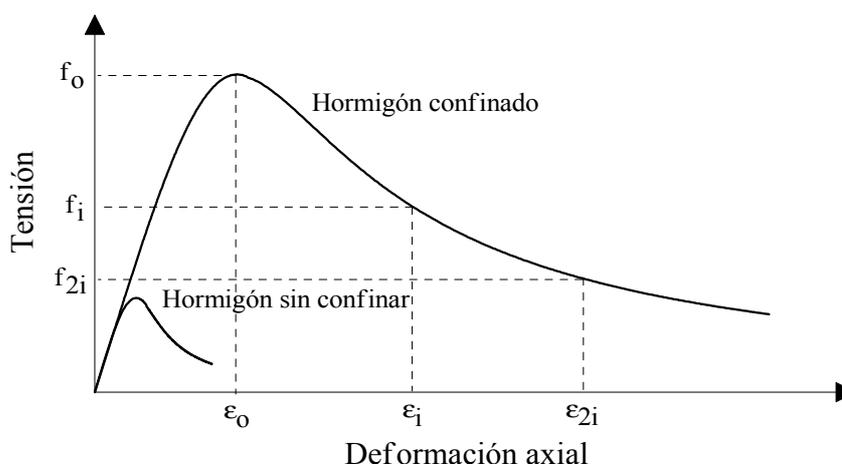


Figura 6.18 Comportamiento típico tensión-deformación del hormigón (Attard y Setunge, 1996)

El primer punto de inflexión es definido como  $(\varepsilon_i, f_i)$  y las expresiones resultantes para las cuatro constantes para el tramo descendente son:

$$A = \frac{f_i (\varepsilon_i - \varepsilon_o)}{\varepsilon_i (f_o - f_i)}, \quad B = 0 \quad (6.6)$$

$$C = (A - 2), \quad D = 1 \quad (6.7)$$

Del mismo modo las cuatro constantes para el segundo punto de inflexión definido como  $(\varepsilon_{2i}, f_{2i})$  son:

$$A = \left[ \frac{\varepsilon_{2i} - \varepsilon_i}{\varepsilon_o} \right] \left[ \frac{\varepsilon_{2i} E_i}{(f_o - f_i)} - \frac{4\varepsilon_i E_{2i}}{(f_o - f_{2i})} \right] \quad (6.8)$$

$$B = (\varepsilon_i - \varepsilon_{2i}) \left[ \frac{E_i}{(f_o - f_i)} - \frac{4E_{2i}}{(f_o - f_{2i})} \right] \quad (6.9)$$

$$C = (A - 2), D = (B + 1) \quad (6.10)$$

donde  $\varepsilon_{2i} = 2\varepsilon_i - \varepsilon_o$ ,  $E_i = f_i/\varepsilon_i$  y  $E_{2i} = f_{2i}/\varepsilon_{2i}$

Mayores detalles del cálculo de estas expresiones puede encontrarse en Attard y Setunge (1999).

Las Figuras 6.19 a la 6.21 muestran la comparación de las respuestas tensión-deformación experimentales y obtenidas mediante el modelo de Sargin (1971). El modelo matemático representa satisfactoriamente el comportamiento tensión-deformación obtenido experimentalmente, sobretodo en los valores de máximas tensiones. Sin embargo, debe mencionarse que existe una ligera diferencia en el módulo inicial, sobretodo en el hormigón de baja resistencia.

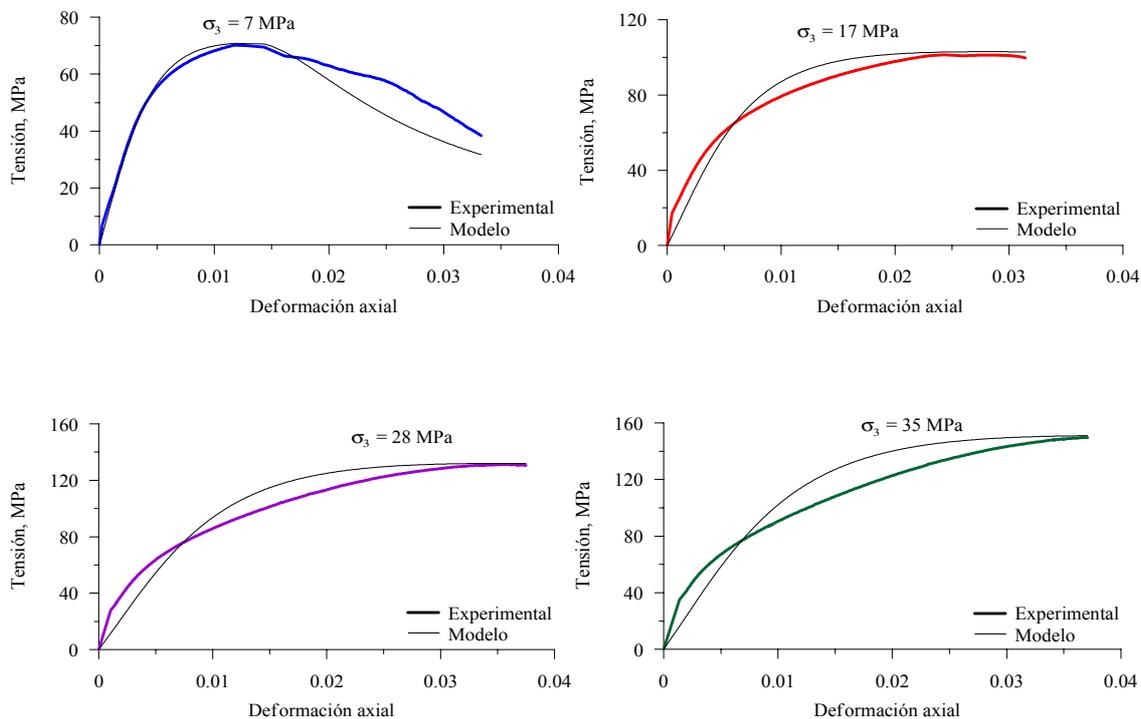


Figura 6.19 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Sargin (1971) para el hormigón H30 confinado por presión hidrostática

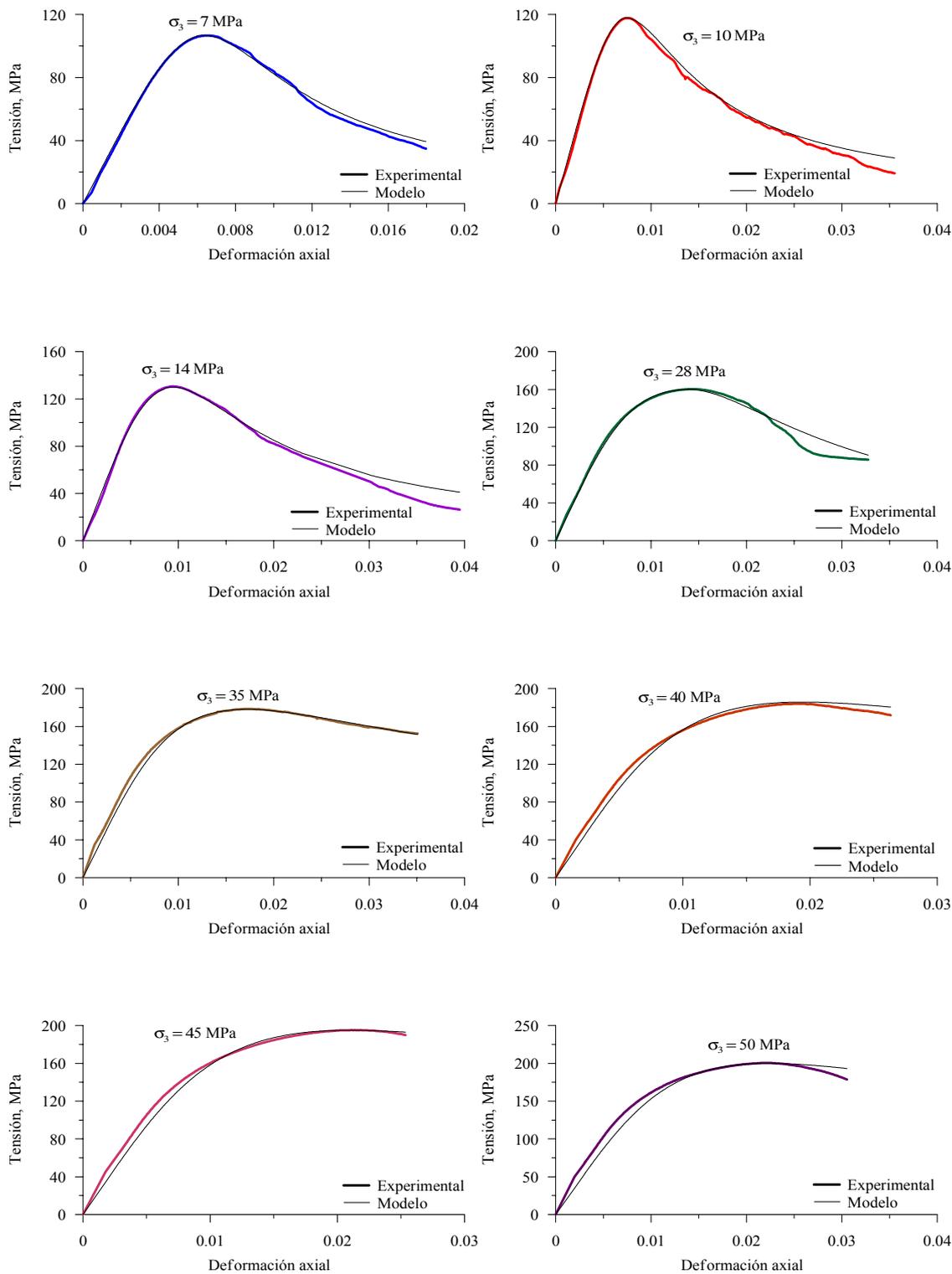


Figura 6.20 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Sargin (1971) para el hormigón H70 confinado por presión hidrostática

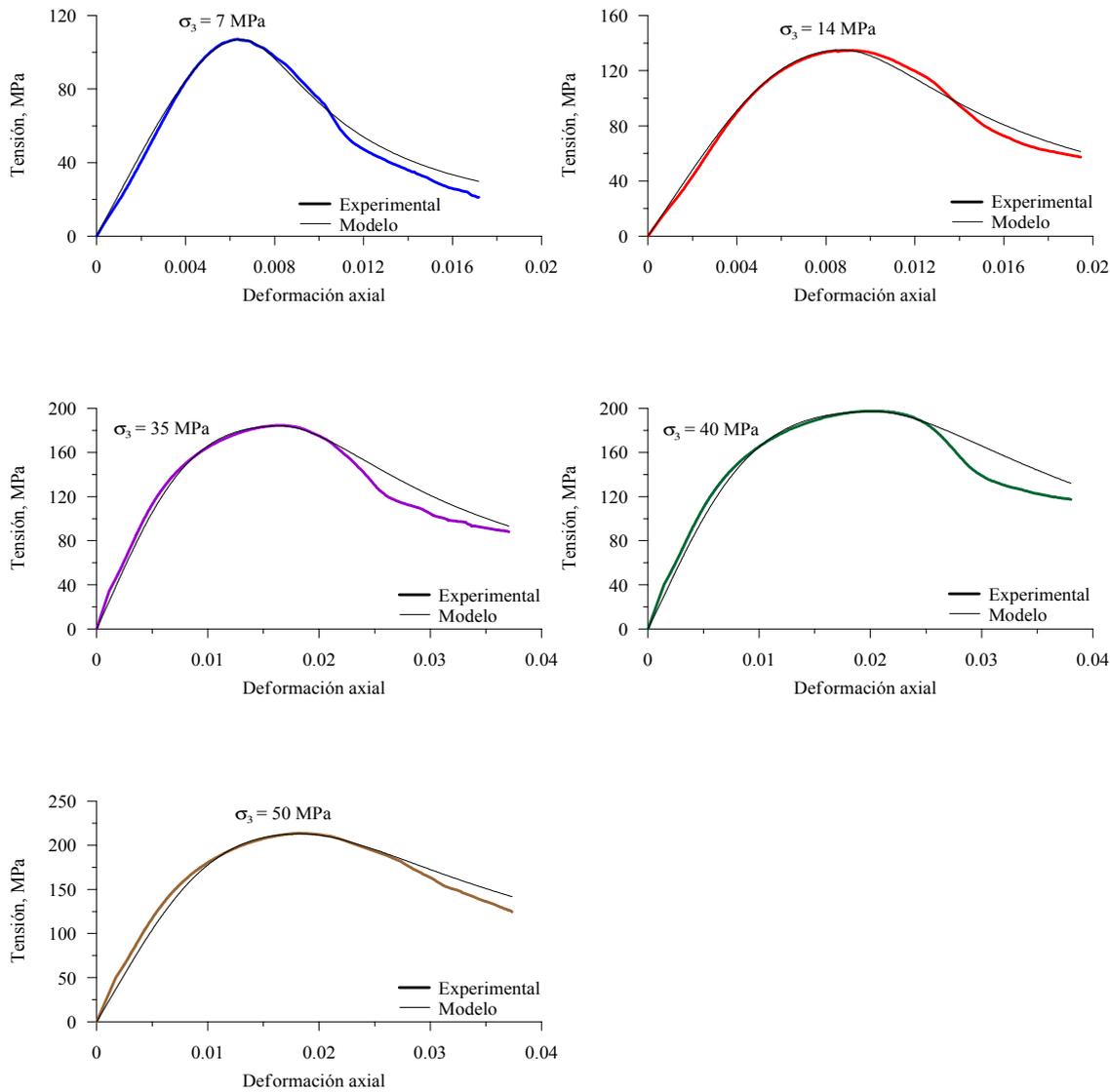


Figura 6.21 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Sargin (1971) para el hormigón HE70 confinado por presión hidrostática

### 6.4.3 Modelo para el hormigón confinado con tubo de acero y FRP

Marques y Marques (2000) desarrollaron un modelo analítico para predecir el comportamiento del hormigón confinado con tubo de acero y materiales compuestos (FRP). Ellos validaron su modelo haciendo una comparación con algunos modelos y valores experimentales existentes en la literatura, obteniendo buenos resultados. Recientemente, ellos hicieron la comparación de los resultados obtenidos mediante su modelo con los resultados experimentales de la presente investigación. El desarrollo completo del modelo se presenta en Marques y Marques (2000). La Figura 6.22 muestra el diagrama de flujo del modelo propuesto para hormigón confinado (Marques y Marques, 2000).

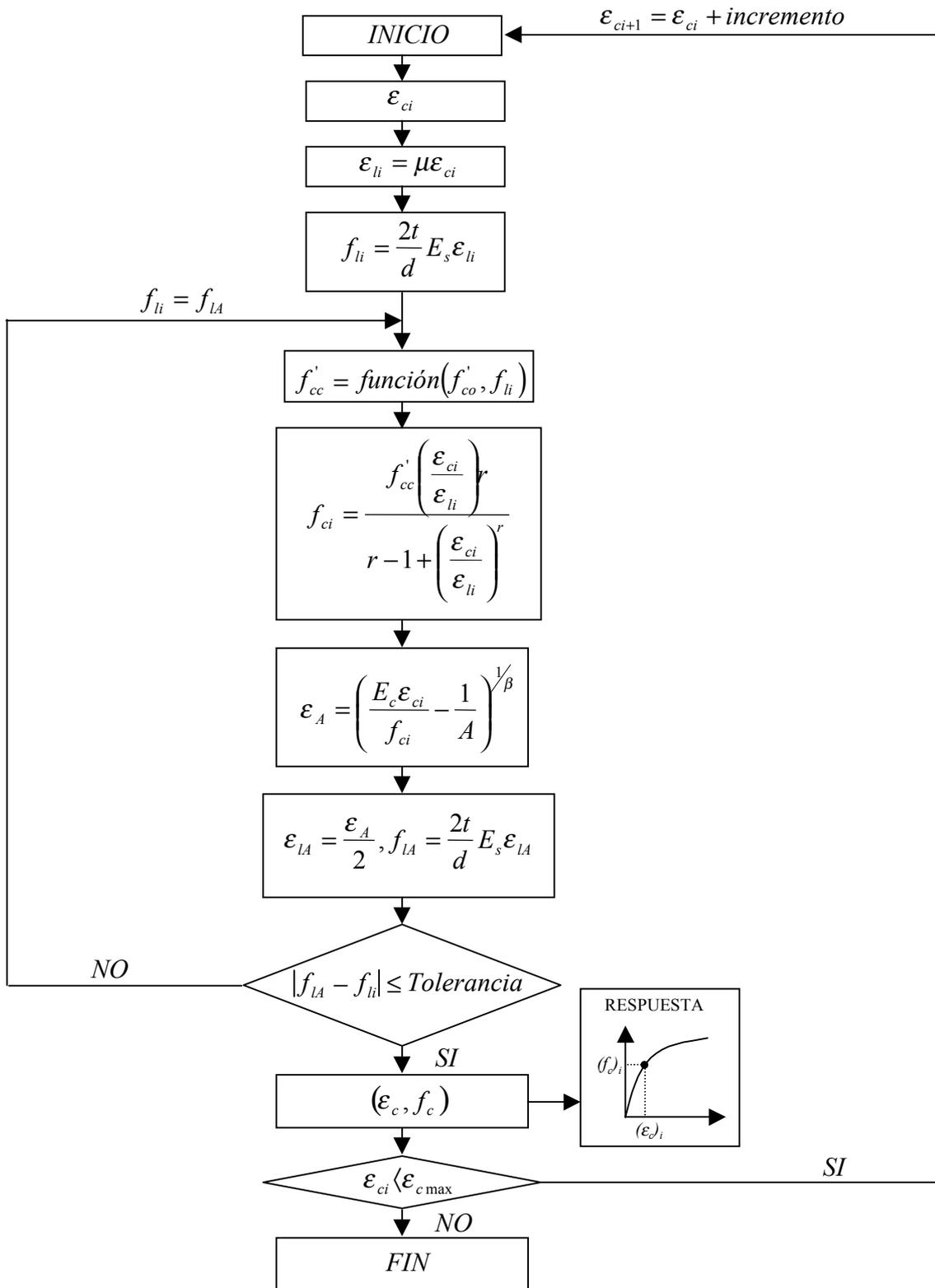


Figura 6.22 Diagrama de flujo del modelo de confinamiento propuesto (Marques y Marques, 2000)

La información necesaria para aplicar el modelo incluye: resistencia a compresión del hormigón sin confinar  $f'_{co}$ , su módulo de elasticidad  $E_c$  y coeficiente de Poisson  $\mu$ , diámetro de la sección de hormigón  $d$ , módulo de elasticidad del material de confinamiento en la dirección circunferencial  $E_s$ , su resistencia a tracción  $f_s$ , y su espesor  $t$ .

Como la presión lateral de confinamiento varía con la deformación axial, la respuesta corresponde a una infinidad de curvas tensión-deformación durante el proceso de carga. Para cada nivel de deformación impuesta al hormigón le corresponde una relación entre la tensión y deformación. Considerando esto, el modelo de Marques y Marques (2000) siguen un procedimiento iterativo, basado en el modelo de Spoelstra y Monti (1999), para incorporar la relación constitutiva del hormigón confinado. De acuerdo al diagrama de flujo que se muestra en la Figura 6.22 el modelo se aplica de la siguiente manera:

1. Se introduce un valor inicial para la deformación axial  $\varepsilon_c$ .
2. Se asume un valor para la deformación lateral (por ejemplo,  $\varepsilon_l = \mu\varepsilon_c$ )
3. Calcula la presión lateral  $f_l$  correspondiente a la deformación lateral  $\varepsilon_l$ .
4. Se obtiene la tensión de compresión del hormigón  $f'_{cc}$  asociada a  $f'_{co}$  y  $f_l$ . El modelo incorpora varios criterios de rotura, que el usuario puede elegir: Criterio de Mander et al. (1988), Razvi y Saatcioglu (1999) y Cusson y Paultre (1999), entre otros.
5. Con  $\varepsilon_c$  y  $f'_{cc}$  se determina  $f_c$ .
6. Con  $\varepsilon_c$  y  $f_c$ , se calcula la deformación de área  $\varepsilon_A$ .
7. Haciendo  $\varepsilon_l = \varepsilon_A/2$ , se obtiene un nuevo valor de  $f_l$ .
8. Si este nuevo valor de  $f_l$  es prácticamente igual al anterior (tolerancia asumida por el usuario), se asume que se ha encontrado un punto  $(\varepsilon_c, f_c)$  de la curva tensión-deformación. Entonces, se incrementa el valor de la deformación  $\varepsilon_c$  y se repite la operación hasta encontrar un nuevo valor. En caso de que el último valor  $f_l$  no estuviese dentro de la tolerancia, se asume este valor de  $f_l$  como nuevo valor de la presión lateral y se calcula nuevamente el valor  $f'_{cc}$  repitiéndose la secuencia de operaciones.
9. El programa finaliza cuando el valor  $\varepsilon_c$  alcanza el valor  $\varepsilon_{cmax}$  predefinido.

A continuación se enumeran algunas consideraciones y expresiones útiles para el desarrollo del modelo. Para mayores detalles referirse a Marques y Marques (2000).

El modelo es aplicable para predecir el comportamiento del hormigón confinado con tubo de acero y FRP, cuando la carga se aplica sobre la superficie del hormigón y propone una relación constitutiva axial que adopta la deformación del área, denominada  $\varepsilon_A$ , como parámetro de control de la degradación de la rigidez. En consecuencia, la degradación del hormigón se relaciona con su deformación de área mediante:  $(\varepsilon_A = 2\varepsilon_l)$  donde  $\varepsilon_l$  es la deformación lateral. Este parámetro es usado como un indicador del estado de la degradación interna del hormigón cuando está sometido a una deformación axial creciente. Esta idea es la

base del modelo constitutivo presentado por Pantazopoulou y Mills (1995). El modelo de Marques y Marques (2000) es un modelo constitutivo simple para hormigón sin confinar y confinado sometido a compresión axial y proponen la siguiente relación:

$$f_c = \frac{E_c}{1 + A\varepsilon_A^\beta} \varepsilon_c \quad (6.11)$$

donde  $E_c$  es el módulo tangente inicial del hormigón,  $A$  y  $\beta$  son constantes del material y  $f_c$  es la tensión axial correspondiente a la deformación axial  $\varepsilon_c$ . En general,  $\varepsilon_A$  es función de la deformación axial  $\varepsilon_c$  y de la presión lateral de confinamiento  $f_l$ .

Las constantes del material del modelo de Marques y Marques (2000),  $A$  y  $\beta$ , son independientes de la presión de confinamiento y pueden ser calculados en función de las características mecánicas del hormigón sin confinar. Las expresiones son:

$$A = \frac{E_c \varepsilon_c - f_c'}{f_c'} (\varepsilon_c)^{-\beta} \quad (6.12)$$

$$\beta = \frac{1}{4 - 6\mu} \left( 1 + \frac{f_c'}{E_c \varepsilon_c - f_c'} \right) \quad (6.13)$$

Para el desarrollo del proceso iterativo para hormigón confinado se utiliza otro modelo constitutivo que describe el comportamiento tensión-deformación para una determinada presión lateral. Para esto Marques y Marques (2000) utilizan una expresión propuesta por Mander et al. (1988).

El modelo propuesto por Mander et al. (1988) propone la siguiente expresión:

$$f_c = \frac{f_{cc}' \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_l} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_l} \right)^r} \quad (6.14)$$

donde  $f_{cc}'$  es la resistencia a compresión del hormigón confinado y  $\varepsilon_l$  su deformación axial correspondiente. Además

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{scc}} \quad (6.15)$$

$$E_{scc} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (6.16)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (6.17)$$

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \quad (6.18)$$

donde  $E_c$  es el módulo de elasticidad del hormigón confinado, en MPa.

Para el caso de cilindros de hormigón confinado por espirales o estribos circulares, Mander et al. (1988) propone la siguiente expresión:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} - 1.254 \right) \quad (6.19)$$

Razvi y Saatcioglu (1999) proponen que la resistencia a compresión y deformación axial del hormigón confinado vienen dados por:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad (6.20)$$

$$\epsilon_l = \epsilon_o (1 + 5k_3 K) \quad (6.21)$$

donde  $k_3 = \frac{40}{f'_{co}} \leq 1$  y  $K = \frac{k f_l}{f'_{co}}$

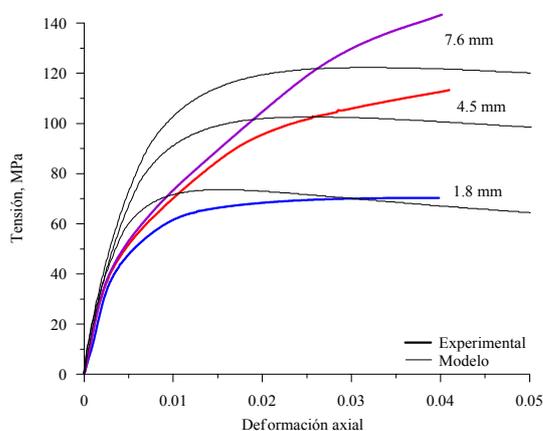
$$k_1 = 6.7 (f_l)^{-0.17} \quad (6.22)$$

En el caso de hormigón de sección circular confinado por encamisado lateral, la presión de confinamiento puede obtenerse en función de la deformación lateral, el cual coincide con la deformación circunferencial del encamisado, mediante la expresión:

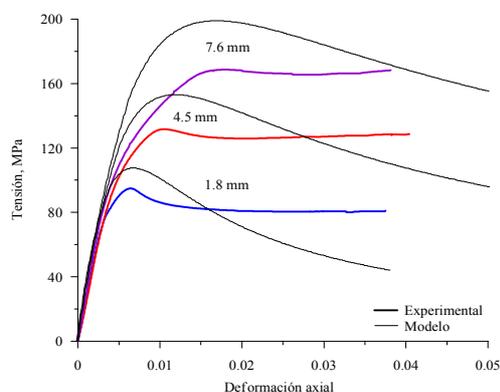
$$f_l = \frac{2t}{d} E_s \epsilon_l \quad (6.23)$$

donde  $E_s$  es el módulo de elasticidad circunferencial del encamisado.

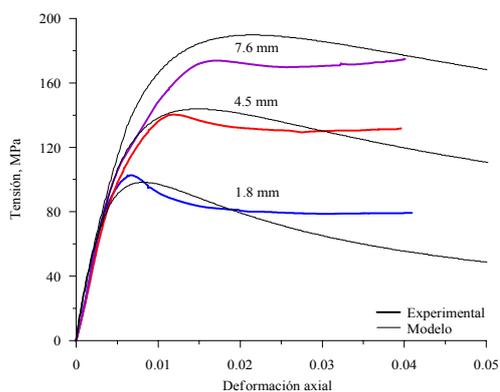
Las Figuras 6.23 a la 6.27 muestran la comparación de las respuestas tensión-deformación experimentales y obtenidas mediante el modelo de Marques y Marques (2000). En términos generales se puede decir que el modelo utilizado es bastante representativo del comportamiento tensión-deformación experimental de los hormigones estudiados. En la mayoría de los casos se alcanza aproximadamente el mismo nivel de tensión máxima. Sin embargo, en algunos casos existen diferencias, especialmente para el hormigón confinado con tubo de acero. En este caso los resultados son bastante comparables para el hormigón HE70 el cual incluye un aditivo reductor de retracción (ARR), mientras que para el hormigón H30 y H70 existen diferencias las cuales son mayores cuando se incrementa el espesor del tubo de acero (Ver Figura 6.23). Se podría decir que para el hormigón HE70 el modelo asigna valores de presión de confinamiento más próximos al valor real, por lo tanto, la predicción del comportamiento tensión-deformación es más cercana al real.



a) Hormigón H30



b) Hormigón H70



c) Hormigón HE70

Figura 6.23 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Marques y Marques (2000) para hormigón confinado con tubo de acero

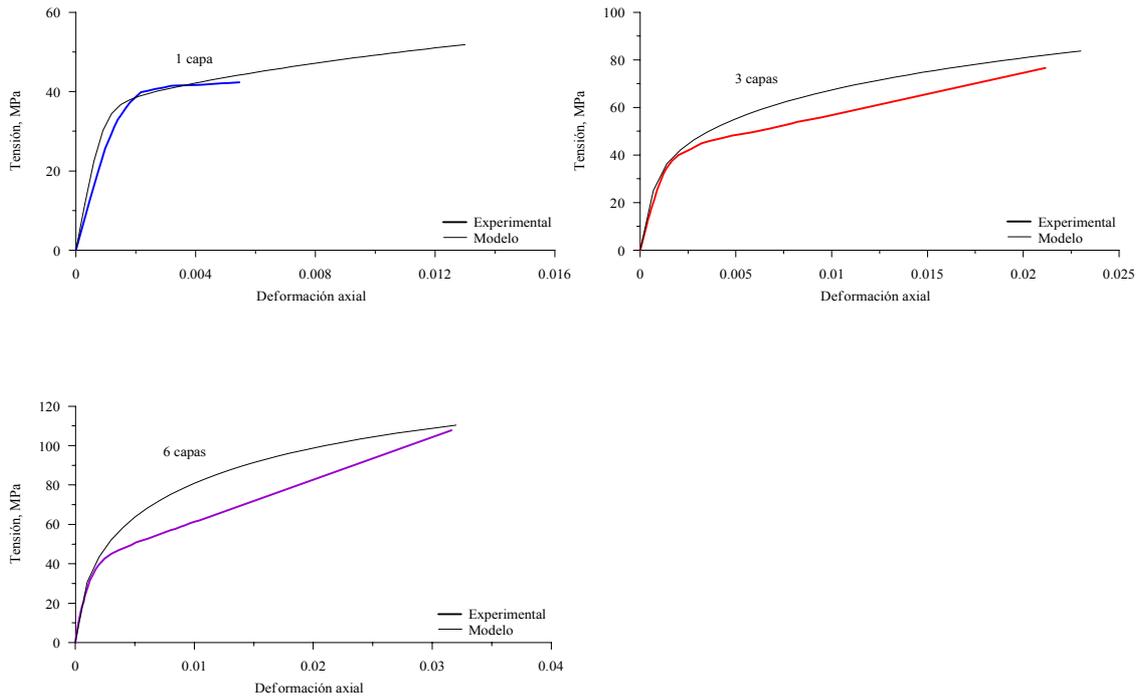


Figura 6.24 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Marques y Marques (2000) para el hormigón HF30 confinado con FRP de carbono

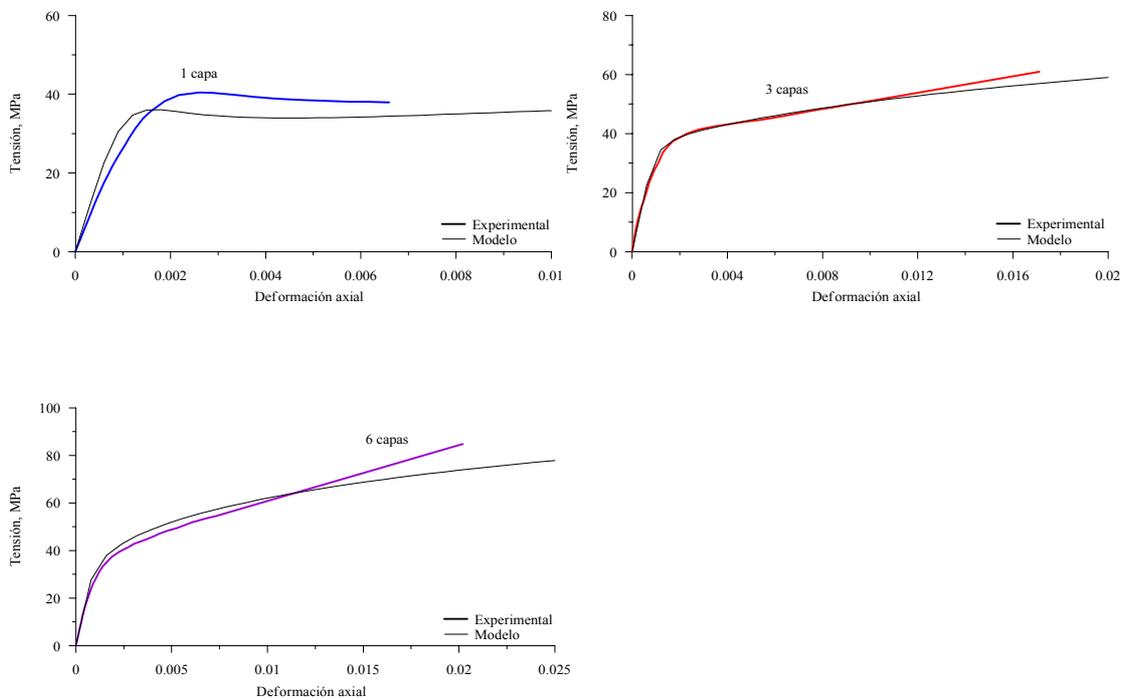


Figura 6.25 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Marques y Marques (2000) para el hormigón HF30 confinado con FRP de vidrio

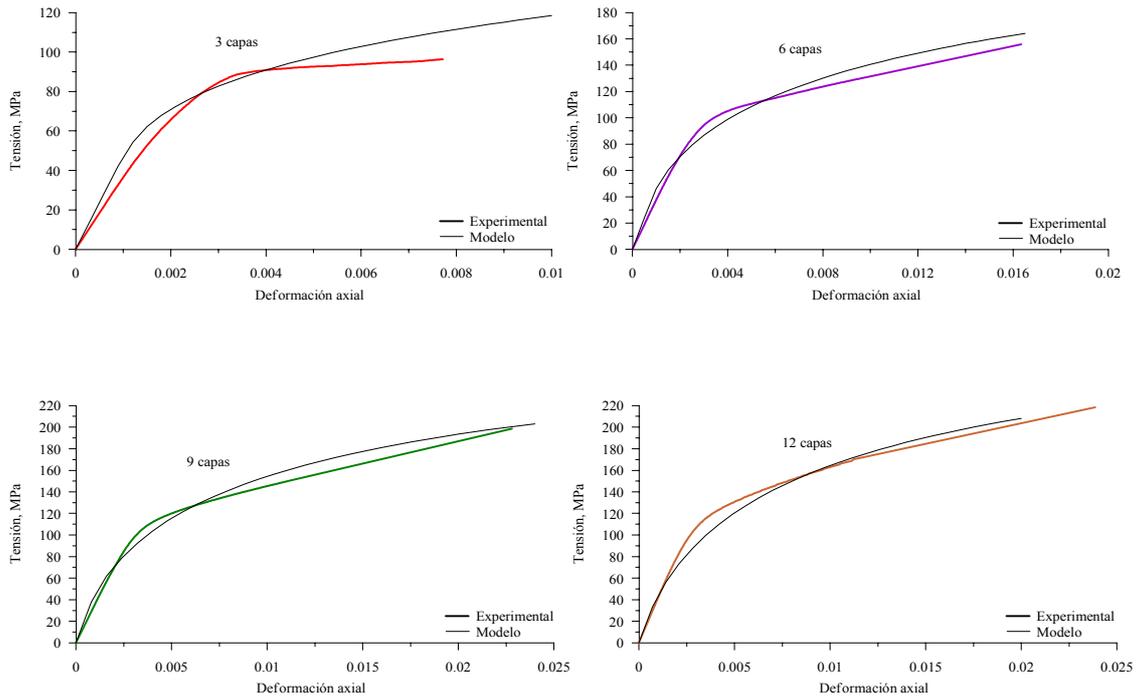


Figura 6.26 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Marques y Marques (2000) para el hormigón HF70 confinado con FRP de carbono

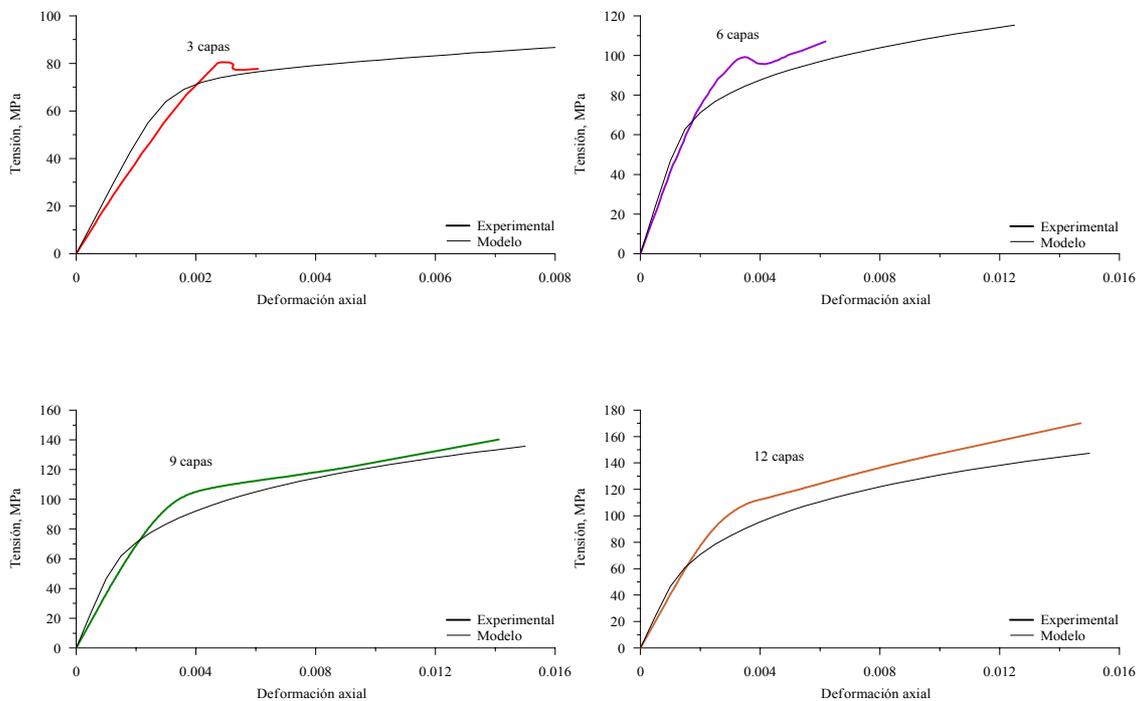


Figura 6.27 Comparación entre los resultados experimentales y del modelo propuesto por Marques y Marques (2000) para el hormigón HF70 confinado con FRP de vidrio

## 6.5 CONCLUSIONES

Se ha comparado los diferentes sistemas de confinamiento empleado determinándose la influencia sobre el hormigón sin confinar. En primer lugar se hizo una comparación global de los 3 sistemas de confinamiento y en forma particular entre los resultados del confinamiento en célula triaxial y tubos de acero.

Las principales conclusiones son las siguientes:

En términos generales, hay un incremento de resistencia y capacidad de deformación cuando las probetas son confinadas con los sistemas de confinamiento estudiados. Sin embargo, se observa una mayor influencia en el hormigón de baja resistencia.

Los resultados de tensión máxima del hormigón confinado en célula triaxial y tubos de acero son bastante similares, aun cuando las curvas típicas tensión-deformación son diferentes mas allá de la carga máxima. En el caso del hormigón confinado en célula triaxial la curva tensión-deformación presenta una parte descendente, mientras que en el caso del hormigón confinado con tubo de acero la curva alcanza una aparente plasticidad al alcanzar la carga máxima.

Para el hormigón de baja resistencia el incremento de la tensión máxima de los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero es del orden de 4 veces la tensión máxima del hormigón sin confinar para un nivel de confinamiento del orden de 1. En el caso de los hormigones confinados con 6 capas de FRP vidrio y carbono este incremento fue de 2 y 2.6 veces la tensión máxima del hormigón sin confinar, respectivamente. Por otro lado, para duplicar la tensión del hormigón sin confinar es suficiente aplicar una presión hidrostática de 7 MPa o confinar el hormigón con tubo de acero de 1.8 mm de espesor. Y en el caso de los hormigones confinados con FRP es necesario confinar con 6 capas de FRP de vidrio ó 3 capas de FRP de carbono para alcanzar duplicar la tensión del hormigón sin confinar.

En el caso del hormigón de alta resistencia el incremento de la tensión máxima para los hormigones confinados por presión hidrostática y tubo de acero es del orden de 2.5 para un nivel de confinamiento del orden de 0.5. En los casos de los hormigones confinados con 12 capas de FRP de vidrio y carbono este incremento fue de 2.5 y 3.1 veces la tensión máxima del hormigón sin confinar, respectivamente. Asimismo, la tensión máxima se puede duplicar si el hormigón se confina con 14 MPa de presión hidrostática o confinando el hormigón con un tubo de acero de 4.5 mm. De la misma manera se necesitan 9 capas de FRP de vidrio ó 6 capas de FRP de carbono para duplicar la tensión del hormigón sin confinar.

Para los mismos niveles de confinamiento las máximas deformaciones del hormigón confinado por presión hidrostática y tubo de acero son similares. En el hormigón de baja resistencia se alcanzaron incrementos en la deformación máxima del orden de 19 veces la deformación del hormigón sin confinar, para el nivel de confinamiento igual a 1. En el caso

del hormigón de alta resistencia los incrementos fueron del orden de 8 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar para un nivel de confinamiento de 0.5.

En el caso del hormigón de baja resistencia confinado con 6 capas de FRP de vidrio el incremento en la deformación máxima fue de 8.4 veces la deformación máxima el hormigón sin confinar, mientras que para 6 capas de FRP de carbono fue de 13.2 veces. Del mismo modo en el hormigón de alta resistencia confinado con 12 capas de FRP de vidrio este incremento fue de 6 veces mientras que para 12 capas de FRP de carbono fue de 10 veces.

Se hizo una comparación con dos modelos analíticos existentes en la literatura. Los resultados muestran que los modelos representan satisfactoriamente los resultados experimentales. En la mayoría de los casos se alcanza aproximadamente los mismos niveles de tensión máxima. Sin embargo, existen algunas diferencias entre los resultados experimentales y del modelo, principalmente para el hormigón confinado con tubo de acero. En este caso los resultados son bastante aproximados para el hormigón HE70, el cual incluye un aditivo reductor de retracción en su composición. En los casos de los hormigones H30 y H70 confinado con tubo de acero el modelo presenta diferencias con los valores experimentales, las cuales son mayores a medida que se incrementa el espesor del tubo de acero. Esto puede atribuirse a que el modelo asigna una presión de confinamiento diferente al valor real, debido a que el confinamiento está relacionado directamente a la deformación lateral de la probeta. Otros motivos pueden ser debido a que los criterios de resistencia utilizados fueron originalmente propuestos para confinamiento por armaduras longitudinales y laterales (estribos circulares y espirales).