



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 4

HORMIGÓN CONFINADO CON TUBO DE ACERO

4.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 2 se plantearon los objetivos principales de este estudio que son generar información experimental del hormigón sometido a confinamiento activo y pasivo. En el capítulo anterior se ha estudiado el confinamiento activo en célula triaxial. El presente capítulo presenta ensayos de probetas cilíndricas de hormigón sometidos a confinamiento pasivo mediante tubos cilíndricos de acero. Los parámetros experimentales son la resistencia del hormigón y el espesor del tubo de acero; se usaron dos hormigones con resistencias características de 25 y 60 MPa, y 3 espesores diferentes de tubo de acero.

Los objetivos principales de este capítulo son caracterizar el comportamiento del hormigón sometido a confinamiento pasivo. Asimismo, estudiar la influencia del espesor del tubo de acero y comparar los resultados obtenidos experimentalmente.

Para alcanzar estos objetivos, se presenta en primer lugar el estado del conocimiento del hormigón confinado con tubo de acero, seguido por el programa experimental de ensayos realizados, presentación y análisis de los resultados obtenidos, comparación con resultados de otras investigaciones y las conclusiones particulares de este estudio.

4.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En los últimos años se ha incrementado el empleo de columnas tubulares de acero rellenos de hormigón en la industria de la construcción en aplicaciones estructurales (Ralston y Korman, 1989), especialmente en regiones sísmicas (Ge y Usami, 1992). Esto se debe en parte a sus excelentes propiedades de resistencia sísmica, tales como alta resistencia, alta ductilidad y gran capacidad de absorción de energía. En general, se conoce que la construcción con tubo de acero y hormigón puede resultar en un sistema estructural eficiente (US-Japan Planning Groups, 1992).

La mejora de las propiedades estructurales de los tubos de acero rellenos de hormigón se debe a la acción compuesta de los elementos constituyentes. Cuando se incrementa la deformación longitudinal aplicando compresión, la expansión lateral del hormigón está restringida por el tubo de acero. Consecuentemente, se desarrolla una presión radial en la interface acero-hormigón. En este estado, el núcleo de hormigón está sometido a un estado triaxial de tensiones y el tubo a tensiones biaxiales. Por lo tanto, la carga correspondiente puede ser considerablemente mayor que la suma separada de las cargas del acero y hormigón. El nivel de incremento en la carga causada por el efecto del confinamiento del tubo de acero sobre el núcleo de hormigón depende de varios factores, tales como, espesor de tubo de acero, relación de esbeltez y forma de la sección transversal. En el caso de columnas de tubos circulares de acero rellenos de hormigón, el tubo de acero tiene mayor efecto de confinamiento que en columnas cuadradas (Shams y Saadeghvaziri, 1997).

En general, los tubos de acero interactúan con el núcleo de hormigón en tres formas: (1) confina el núcleo, por lo tanto, incrementa su resistencia a compresión y ductilidad, (2) proporciona al núcleo resistencia adicional al corte, y (3) dependiendo de la resistencia de adherencia, desarrolla una acción compuesta, por lo que también incrementa la resistencia a la flexión del hormigón. El núcleo en cambio, previene el pandeo.

Los primeros trabajos de hormigón confinado con tubo de acero fueron reportados por Bur (1912). Trabajos posteriores pusieron en evidencia un considerable incremento de la capacidad portante de un pilar metálico cuando es relleno con hormigón (Faber, 1956; Stevens, 1959; Jones y Risk, 1963). A finales de los años 60 comenzaron a surgir guías de construcción de perfiles tubulares de acero, y se desarrollaron trabajos de investigación sobre pilares mixtos.

Una extensa búsqueda bibliográfica permite establecer que se han realizado varias investigaciones para estudiar el comportamiento de tubos de acero rellenos de hormigón (Furlong, 1967; Gardner y Jacobson, 1967; Knowles y Park, 1969; Ghosh, 1977; Tomii et al., 1977; Sakino et al., 1985; Bridge y Webb, 1992; Ge y Usami, 1992; Lahlou et al., 1992; Schneider, 1998; Sun et al., 1999; O'Shea y Bridge, 2000). Sin embargo, la literatura existente indica que se ha prestado mayor atención a los tubos de pared gruesa rellenos de hormigón.

En la mayoría de las investigaciones, la relación entre la longitud y diámetro de probeta (L/D) estuvo en el rango de 2 y 9 (Knowles y Park 1969; Tomii et al., 1977; Bridge y Webb 1992; Lahlou et al., 1992; Schneider 1998; Sun et al., 1999; O'Shea y Bridge 2000). El máximo espesor de tubo de acero estudiado fue de 4 mm (Tomii et al., 1977; Ge y Usami 1992; Sun et al., 1999).

Aunque no está bien definido el comportamiento del tubo de acero relleno de hormigón, existe concordancia en que los tubos circulares presentan mejor comportamiento que los tubos cuadrados (Tomii et al., 1977; Sun et al., 1999) y que en general, el sistema experimenta un aumento en la capacidad de carga, incrementando la resistencia y ductilidad producido por el efecto del confinamiento proporcionado por el tubo de acero.

Por otro lado, la mayoría de los modelos de confinamiento usado para predecir el comportamiento tensión-deformación del hormigón confinado con tubo de acero proviene de modelos que originalmente fueron propuestos para predecir la respuesta del hormigón confinado con estribos de acero (Mander et al., 1988; Saatcioglu y Razvi, 1992). Sin embargo, estos modelos sobrestiman los valores cuando son aplicados al hormigón confinado con tubo de acero (Saaman, 1997).

En este sentido, la presente investigación pretende complementar la información existente de hormigones de baja y alta resistencia cuando son sometidos a confinamiento lateral pasivo, mediante ensayos de tubos cilíndricos de acero rellenos de hormigón.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

4.3.1 Programa de ensayos

Se ensayaron probetas cilíndricas de hormigón de 150 × 300 mm, confinadas con tubos de acero de 3 espesores diferentes. Las resistencias características de los hormigones sin confinar fueron de 25 y 60 MPa. En cada caso se ensayaron 3 probetas. Dos probetas fueron ensayadas con aplicación de carga únicamente sobre la superficie de hormigón y la tercera probeta fue cargada simultáneamente sobre el tubo de acero y el núcleo de hormigón. Las probetas ensayadas corresponden a las fabricadas en la primera etapa (Tabla 2.3, Capítulo 2). La Tabla 4.1 presenta en detalle, el alcance del programa de ensayos.

Todas las configuraciones de ensayo fueron a compresión axial y el control fue por desplazamiento a una velocidad de 0.005 mm/seg.

Tabla 4.1 Ensayos de confinamiento con tubo de acero: Programa de ensayos

Tipo de hormigón Serie	Identificación	Espesor de tubo de acero <i>e</i> , mm
H30-H70-HE70	A	1.8
	B	4.5
	C	7.5

4.3.2 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). Este hormigón de referencia es el mismo empleado en el estudio del hormigón confinado en célula triaxial. El procedimiento de aplicación de carga, y obtención de las curvas tensión-deformación son los presentados en el capítulo anterior (Sección 3.3.2).

4.3.3 Ensayo de hormigón confinado con tubo de acero

Los ensayos fueron realizados por control de desplazamiento del pistón de la MTS (Ver Figura 2.5, Capítulo 2). Se realizaron dos tipos de ensayo: un primer ensayo aplicando carga únicamente en la sección de hormigón, y un segundo ensayo, aplicando carga sobre la sección compuesta, tubo de acero y sección de hormigón. A continuación se presenta el procedimiento seguido de la puesta en marcha del ensayo.

Previo a la instrumentación todas las probetas fueron pulidas para garantizar la uniformidad de la superficie de ensayo. Las probetas previamente instrumentadas con las galgas extensométricas se colocan en la máquina de ensayo. En el caso del ensayo con aplicación de carga únicamente en la sección de hormigón, se colocan 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, para garantizar que la carga sea aplicada únicamente sobre la superficie de hormigón. Además, para minimizar el efecto de la fricción entre las placas de acero y la superficie de hormigón se colocó en la interface una combinación de teflón/grasa/teflón (con planchas de teflón de 0.1 mm). Posteriormente, se colocan los transductores de desplazamiento tipo LVDT. En el caso del ensayo con aplicación de carga en toda la sección, no se colocan ni placas de acero ni teflón. La Figura 2.5 (Capítulo 2) presenta la disposición de la probeta para el ensayo con aplicación de carga en la sección de hormigón.

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 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.

En el caso de los hormigones de alta resistencia, durante la ejecución de los ensayos, se hicieron sucesivas series de descarga y carga con el fin de evaluar el cambio de pendiente del descenso y ascenso de la carga y observar la recuperación del ensayo en términos de carga. Esta operación sólo se hizo en el régimen post-pico. El descenso se hizo hasta un nivel del 10% de la carga máxima. La velocidad aplicada fue manual y en la medida de lo posible se trató que fuera similar a la velocidad aplicada en el ensayo.

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 en el tubo de acero. 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 tubo de acero por el registro directo de las galgas extensométricas pegadas en la superficie externa del tubo de acero. 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 al dibujo de las curvas tensión-deformación. Sin embargo, en este caso las curvas tensión-deformación axial calculadas con los LVDTs son independiente de aquellos obtenidos con las galgas extensométricas, por lo que no se hace ninguna comparación entre ellas. Esto se debe a que los LVDTs registran el desplazamiento de la probeta de hormigón en el interior del tubo de acero y las galgas extensométricas las deformaciones en la superficie externa del tubo de acero. Cabe recordar que entre la parte interna del tubo de acero y la superficie de hormigón existe una lámina de teflón de 0.1 mm, colocada para evitar la fricción entre ambos (Ver Sección 2.3.1, Capítulo 2).

4.4 RESULTADOS

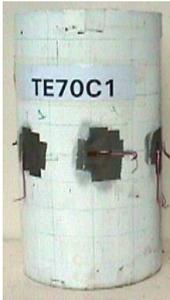
4.4.1 Comportamiento en compresión uniaxial

El modo de rotura, las curvas tensión-deformación axial y las propiedades mecánicas de los hormigones estudiados, se presentan en las Figuras 3.1 y 3.2, y Tabla 3.2 (Capítulo 3), respectivamente. El Anexo A presenta el registro fotográfico del aspecto de las probetas después del ensayo, las curvas tensión-deformación de todas las probetas ensayadas y las propiedades mecánicas de cada probeta.

4.4.2 Comportamiento en compresión uniaxial del hormigón confinado con tubo de acero

El modo de fallo de los hormigones de baja (H30) y alta resistencia (H70 y HE70) confinado con tubo de acero, con aplicación de carga únicamente en la sección de hormigón, está caracterizada por el pandeo local, que se presenta en un extremo o en el centro de la probeta, como se muestra en la Figura 4.1. En esta figura se aprecia que, independientemente del tipo de hormigón, el pandeo se presenta en el extremo superior de la probeta para el espesor de tubo de 1.8 mm. Sin embargo, cuando se incrementa el espesor del tubo de acero, el pandeo se localiza hacia el centro de la altura de la probeta. Por otro lado, también se observó que, la placa de acero que se utilizó para garantizar que la aplicación de carga sea únicamente sobre la sección de hormigón, penetró dentro de la sección confinada, como se muestra en el esquema de la sección transversal de la probeta ensayada (Figura 4.1). En todos los casos la profundidad de penetración de la placa de acero fue mayor en el extremo superior. Sun et al. (1999) observaron un comportamiento muy similar cuando ensayaron probetas cilíndricas de hormigón de 200 mm × 500 mm, confinadas con tubos de acero con espesores entre 1.15 mm y 4.20 mm. En el caso del ensayo con aplicación de carga en toda la sección, el modo de fallo se caracteriza por un pandeo local, que se presenta principalmente en el extremo superior de la probeta, como se muestra en la Figura 4.2. El Anexo E presenta un registro fotográfico del aspecto de las probetas después de los ensayos.

Las Figuras 4.3 a 4.5 muestran el comportamiento tensión-deformación axial de los hormigones de baja (H30) y alta resistencia (H70 y HE70) confinados con tubos de acero, ensayados a compresión axial con aplicación de carga únicamente en la sección de hormigón. Las curvas corresponden al promedio de dos ensayos en el caso del hormigón de baja resistencia (H30), y en el caso de los hormigones de alta resistencia (H70 y HE70) se presentan las dos curvas de las probetas ensayadas. En el caso del hormigón de alta resistencia (H70) confinado con tubo de acero de 7.6 mm sólo se presenta la curva de una de las probetas ensayadas, debido a que la información de la otra probeta se perdió al finalizar el ensayo. Por otro lado, las Figuras 4.6 a 4.8 muestran las curvas carga-deformación axial de los hormigones ensayados a compresión axial con aplicación de carga en toda la sección. En Anexo F presenta las curvas de las probetas ensayadas.

Hormigón	1.8 mm	4.5 mm	7.6 mm	Observaciones
H30				Pandeo local. En la parte superior para el tubo de menor espesor. En el centro para el tubo de mayor espesor.
H70				Pandeo local. Idéntico al caso anterior.
HE70				Pandeo local. Idéntico al caso anterior.

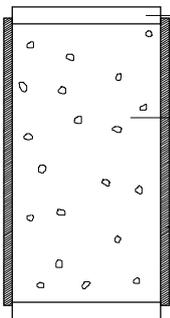
Aspecto de la probeta después del ensayo	Observaciones
<p>Sección transversal</p>  <p>Placa de acero de carga</p> <p>Sección de hormigón</p> <p>Tubo de acero</p>	Las placas superior e inferior de carga penetraron dentro de la sección del tubo de acero.

Figura 4.1 Modos de fallo de los hormigones confinados con diferentes espesores de tubo de acero, con aplicación de carga únicamente en la sección de hormigón

Hormigón	1.8 mm	4.5 mm	7.6 mm	Observaciones
H30				Pandeo local. En todos los casos en la parte superior de las probetas.
H70				Pandeo local. Idéntico al caso anterior.
HE70				Pandeo local. En la parte inferior para el tubo de menor espesor. En la parte superior para los otros espesores.

Figura 4.2 Modos de fallo de los hormigones confinados con diferentes espesores de tubo de acero, con aplicación de carga en toda la sección

De las Figuras 4.3 a 4.5 se puede decir que existe un comportamiento tensión-deformación axial similar entre los hormigones estudiados. Las curvas presentan un tramo inicial lineal, seguido por un tramo curvo hasta alcanzar la carga máxima, y finalmente un tramo descendente, cuya pendiente es función del espesor del tubo de acero. La pendiente del tramo inicial de la curva se incrementa ligeramente cuando se incrementa el espesor del tubo de acero. Contrariamente, la pendiente del tramo descendente (régimen post-pico) disminuye cuando se incrementa dicho espesor. Asimismo, es evidente que el confinamiento incrementa significativamente la resistencia y la capacidad de deformación del hormigón, por lo tanto, su ductilidad. También es notable el incremento de la deformación correspondiente a la tensión máxima, del orden de 0.002 para el hormigón sin confinar a valores tan altos como 0.04 para el hormigón confinado con tubo acero de espesor grueso (7.6 mm).

De la Figura 4.3 se puede decir que un espesor de tubo de acero de 1.8 mm es suficiente para que el hormigón de baja resistencia (H30) alcance el régimen plástico. Sin embargo, para los hormigones de alta resistencia (H70 y HE70) es necesario un espesor de tubo de acero de 7.6 mm para alcanzar este estado, como se observa en las Figuras 4.4 y 4.5. Esto quiere decir que la influencia del confinamiento es diferente para ambos hormigones, siendo mayor para el hormigón de baja resistencia (H30).

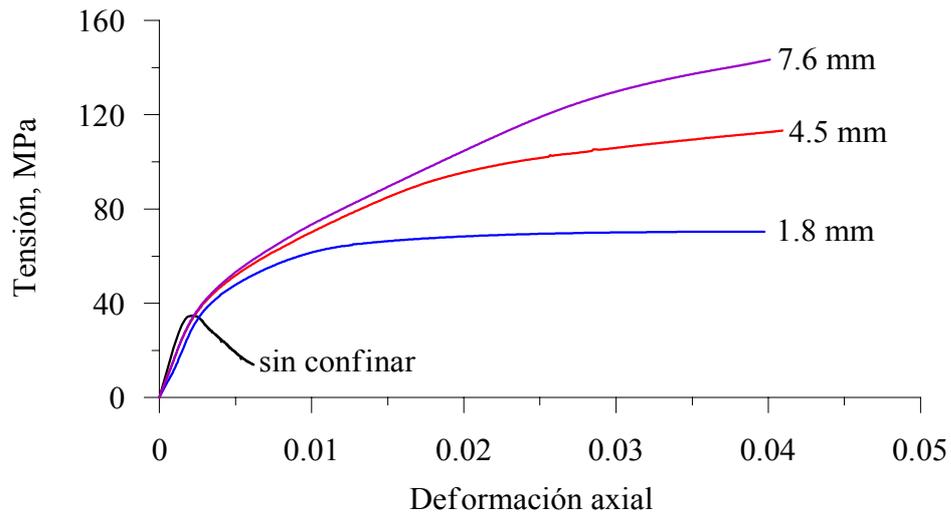


Figura 4.3 Curvas tensión-deformación axial del H30 confinado con tubo de acero

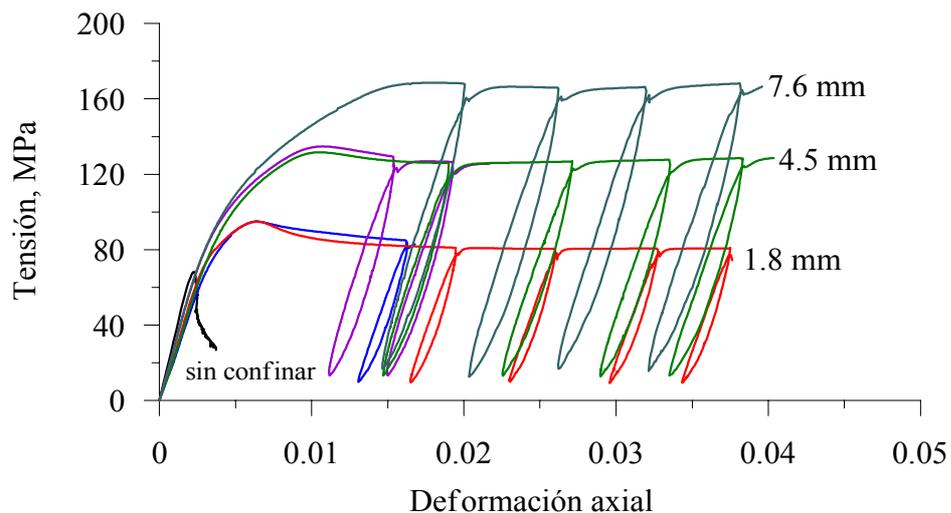


Figura 4.4 Curvas tensión-deformación axial del H70 confinado con tubo de acero

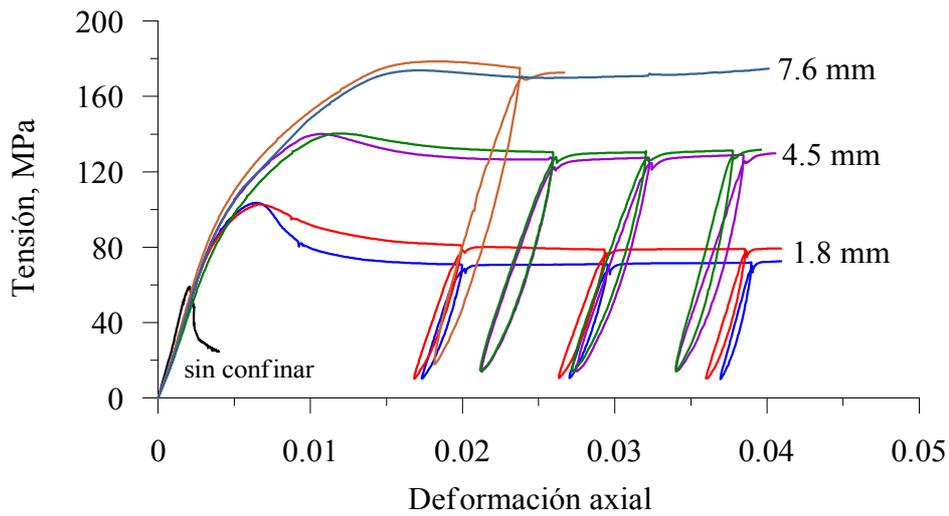


Figura 4.5 Curvas tensión-deformación axial del HE70 confinado con tubo de acero

También, se observa que los valores de tensión máxima de los hormigones de alta resistencia (H70 y HE70) son comparables, aún cuando la resistencia del hormigón HE70 sin confinar tuvo una reducción del orden de 13%, como se muestra en la Tabla 3.2 (Capítulo 3). Sin embargo, las pendientes del brazo descendente (régimen post-pico) de las curvas del hormigón HE70 son ligeramente mayores que las correspondientes al hormigón H70, sobretodo para el hormigón confinado con tubo de acero de 1.8 mm, como se muestra en la Figura 4.6.

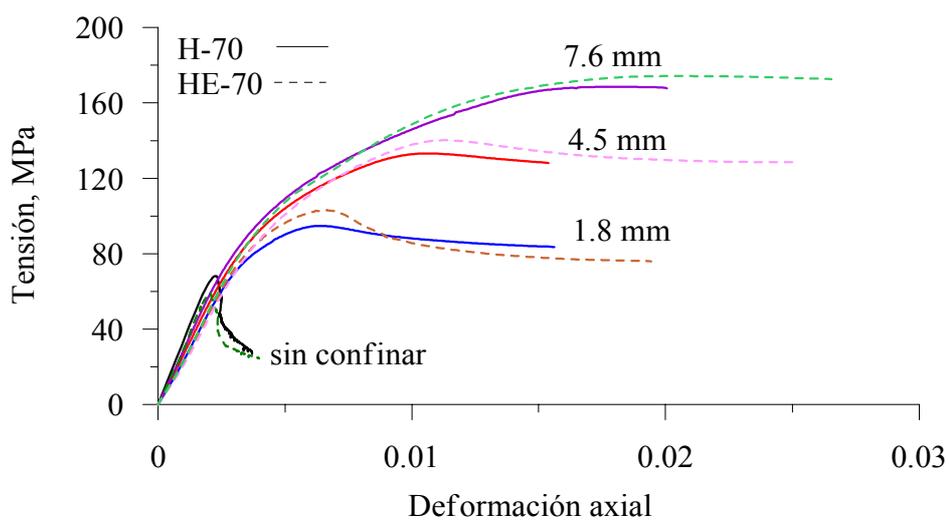


Figura 4.6 Curvas tensión-deformación axial de los hormigones H70 y HE70 confinadas con tubo de acero

Por otro lado, observando los ciclos de descarga y carga a que fueron sometidas durante los ensayos las probetas de alta resistencia (H70 y HE70), se puede decir que hay una recuperación de la carga al valor inicial del ciclo de descarga. Esto sugiere que el hormigón está en un estado de deformación irreversible o plástica dentro del tubo. En el caso del hormigón H70, se hicieron cuatro ciclos de descarga y carga para cada probeta. Las pendientes de las curvas de descarga y carga son similares para todos los ciclos. En el caso del hormigón HE70, se hicieron tres ciclos de descarga y carga, salvo en el caso de la probeta confinada con tubo de acero de 7.6 mm, en la que se hizo un ciclo. Igualmente, las pendientes de las curvas de descarga y carga son similares para todos los ciclos.

Las Figuras 4.7 a 4.9 que corresponden a las curvas de los ensayos con aplicación de carga en toda la sección, muestran un comportamiento similar al observado en los ensayos con aplicación de carga únicamente en la sección de hormigón, es decir, presentan un tramo inicial lineal, seguido por un tramo curvo hasta alcanzar la carga máxima, y finalmente un brazo descendente cuya pendiente depende del espesor de tubo de acero. Las pendientes de los tramos iniciales se incrementa con el incremento del espesor de tubo de acero, mientras que en los tramos descendentes disminuye. Asimismo, las pendientes de los ciclos de descarga y carga son similares.

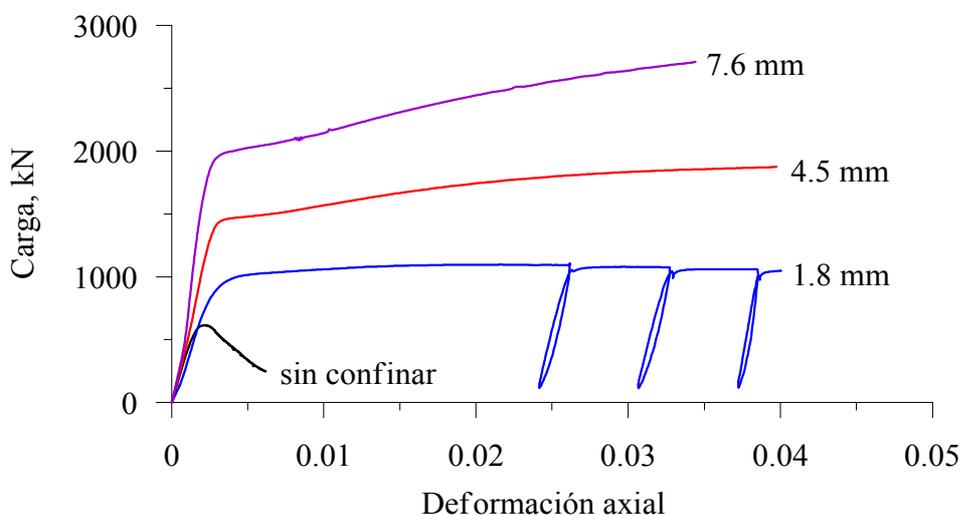


Figura 4.7 Curva carga–deformación axial del H30 confinado con tubo de acero

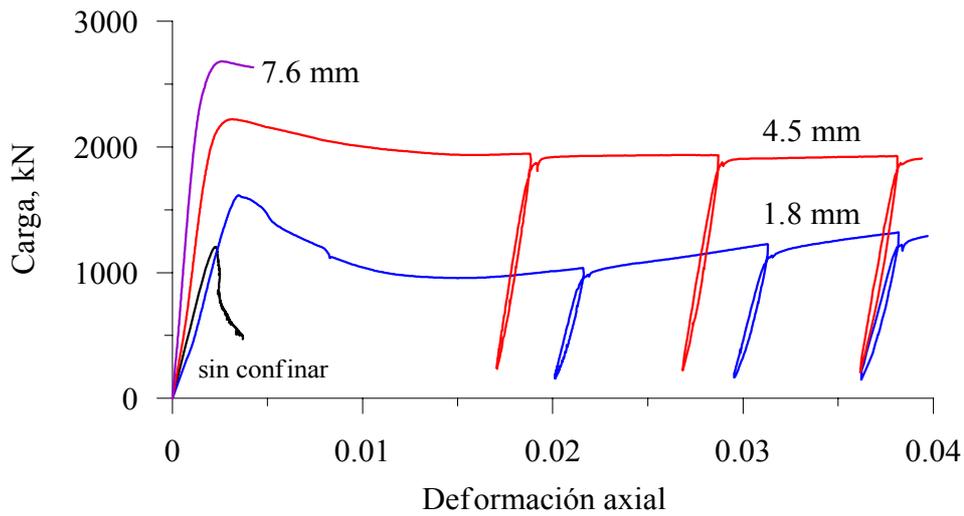


Figura 4.8 Curva carga–deformación axial del H70 confinado con tubo de acero

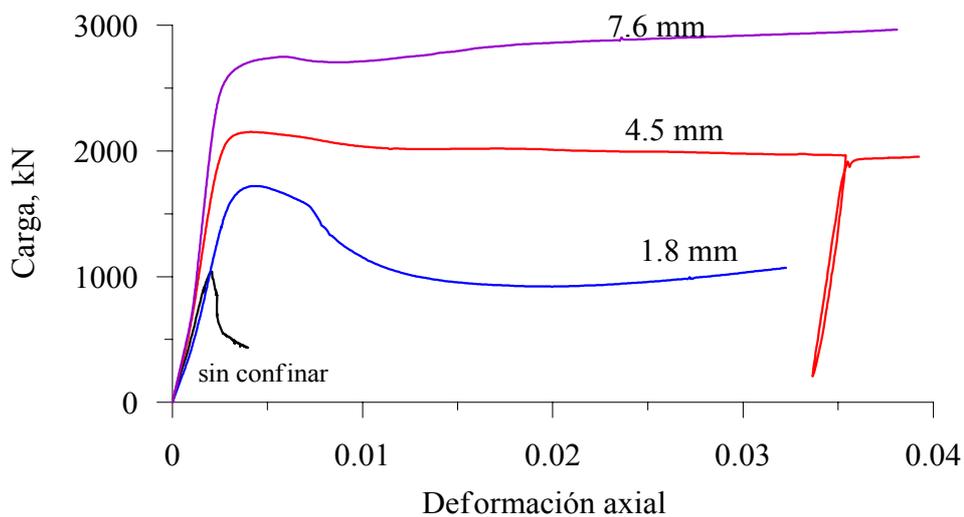


Figura 4.9 Curva carga–deformación axial del HE70 confinado con tubo de acero

Por otro lado, los valores de carga máxima alcanzada por los hormigones de alta resistencia (H70 y HE70), cuando el ensayo es realizado con aplicación de carga en toda la sección, son bastante comparables, como se muestra en la Figura 4.10. También, las pendientes del brazo descendente (régimen post-pico) son similares.

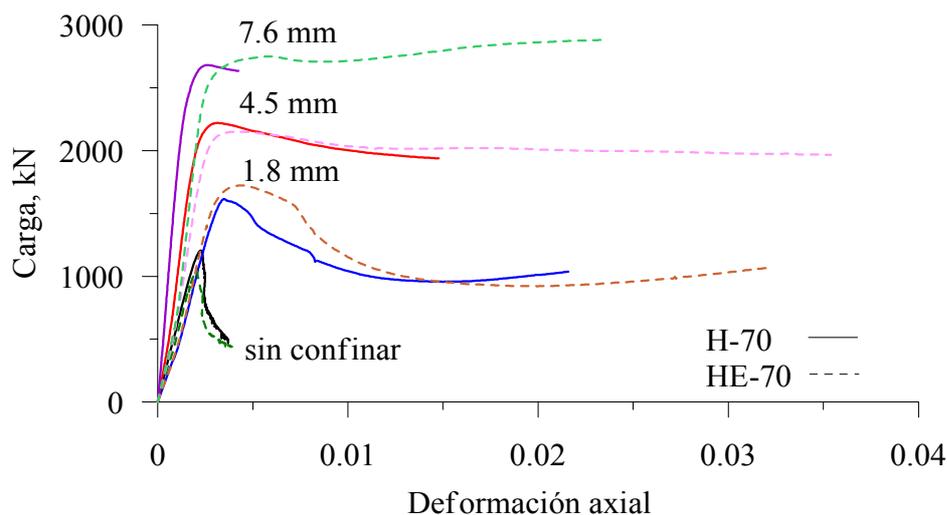


Figura 4.10 Curvas carga-deformación axial de los hormigones H70 y HE70 confinadas con tubo de acero

4.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.5.1 Resistencia

La Tabla 4.2 presenta los resultados de los ensayos con carga aplicada únicamente sobre el hormigón, donde e es el espesor de tubo de acero, f'_c es la tensión máxima del hormigón sin confinar, ϵ_c su correspondiente deformación, f'_{cmax} es la tensión máxima del hormigón confinado, ϵ_{max} su correspondiente deformación, y E_i el módulo inicial. Los datos corresponden al promedio de dos ensayos. El Anexo F presenta los resultados de todas las probetas ensayadas.

Los resultados de la Tabla 4.2 muestran un significativo incremento en resistencia y capacidad de deformación debido al efecto del confinamiento. Se observa que este incremento es mayor cuando el hormigón es confinado con espesores de tubo de acero mayores. Sin embargo, se observa que dicha ganancia es mayor en el hormigón de baja resistencia. Con relación al módulo elástico, se puede decir que hay un ligero incremento cuando se usan mayores espesores de tubo de acero. Esto puede atribuirse al incremento de la rigidez debido al confinamiento. Sin embargo, estos valores son inferiores al correspondiente módulo elástico del hormigón sin confinar debido a que se han determinado el módulo de las probetas confinadas utilizando los desplazamientos totales en lugar del desplazamiento del tercio central.

En el caso del hormigón de baja resistencia H30, se observa un incremento de 100% en la tensión máxima, respecto del hormigón sin confinar, para un espesor de tubo de 1.8 mm. Asimismo, se alcanza un incremento del orden de 130% en la tensión máxima, cuando el

espesor de tubo de acero es de 4.5 mm, y valores de tensión máxima tan altos como 146 MPa para el espesor de tubo de acero de 7.6 mm. Por otro lado, se han alcanzado valores de deformación correspondientes a las tensiones máximas, del orden de 17.3, 19.0 y 19.2 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar, para espesores de tubo de 1.8 mm, 4.5 mm y 7.6 mm, respectivamente.

Tabla 4.2 Resultados de los ensayos de hormigón confinado con tubo de acero

Serie	e mm	f'_{cmax} MPa	ϵ_{max} $\mu\epsilon$	E_i GPa	f'_{cmax}/f_c	$\epsilon_{max}/\epsilon_c$
H30	0	$f'_c = 35$	$\epsilon_c = 2190$	$E_c = 22.8$	1.0	1.0
	1.8	70	37890	14.1	2.0	17.3
	4.5	114	41610	17.0	3.3	19.0
	7.6	146	41950	17.1	4.2	19.2
H70	0	$f'_c = 68$	$\epsilon_c = 2250$	$E_c = 33.7$	1.0	1.0
	1.8	95	6370	24.3	1.4	2.8
	4.5	133	10610	26.8	1.9	4.7
	7.6*	168	17800	28.1	2.5	7.9
HE70	0	$f'_c = 59$	$\epsilon_c = 2030$	$E_c = 29.9$	1.0	1.0
	1.8	104	6590	23.6	1.7	3.2
	4.5	140	11370	23.4	2.4	5.6
	7.6	176	17680	25.2	3.0	8.7

* Un solo valor

Similar tendencia se observa en el hormigón de alta resistencia H70, con grandes incrementos en la tensión máxima y su correspondiente deformación, para los diferentes espesores de tubo de acero. Así, para el espesor de tubo de acero de 1.8 mm, la tensión máxima se incrementó 40%, respecto del hormigón sin confinar. De la misma manera, se incrementa 90% para un espesor de tubo de acero de 4.5 mm. En este caso se alcanzaron valores de tensión máxima tan altos como 168 MPa, equivalentes a incrementos del orden de 150% con respecto del hormigón sin confinar, para un espesor de tubo de acero de 7.6 mm. En el caso de las deformaciones correspondientes a las tensiones máximas, se incrementaron en el orden de 3, 5 y 8 veces el valor de la deformación máxima del hormigón sin confinar, para 1.8 mm, 4.5 mm y 7.6 mm de espesor de tubo de acero, respectivamente. Sin embargo, los valores encontrados muestran que el efecto del confinamiento es mayor en el hormigón de baja resistencia. Así por ejemplo, la tensión máxima del hormigón de baja resistencia H30 se incrementa en 100% para un espesor de tubo de acero de 1.8 mm. Sin embargo, para un espesor de tubo de acero de 4.5 mm en el hormigón de alta resistencia H70 la tensión máxima sólo se incrementó en 90%. De la misma manera, la deformación correspondiente a la tensión máxima, en el caso del hormigón de baja resistencia H30 se incrementa 17 veces el valor de la deformación máxima

del hormigón sin confinar, mientras que en el caso del hormigón de alta resistencia H70 se incrementa 4.7 veces.

En el caso del hormigón de alta resistencia HE70, también se alcanzaron grandes incrementos en la tensión máxima y su correspondiente deformación. Así, por ejemplo, para un espesor de tubo de acero de 1.8 mm la tensión del hormigón confinado se incrementó 70%. Asimismo, se incrementa 137% para un espesor de tubo de acero de 4.5 mm y se alcanzaron valores de tensión máxima tan altos como 176 MPa, que equivale a un incremento del 200% en tensión comparado al hormigón sin confinar, para un tubo de acero de 7.6 mm. De la misma manera, las deformaciones correspondientes a las tensiones máximas se han incrementado en 3, 6 y 9 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar, para espesores de tubo de 1.8 mm, 4.5 mm y 7.6 mm, respectivamente. Por otro, si comparamos los resultados de las tensiones máximas de los hormigones de alta resistencia H70 y HE70, se puede decir que son bastante comparables. Así por ejemplo, la tensión máxima del hormigón H70 fue de 133 MPa, mientras que fue 140 MPa para el hormigón HE70 para un espesor de tubo de acero de 4.5 mm. Sin embargo, si comparamos el incremento de la tensión respecto al hormigón sin confinar es mayor en el caso del hormigón HE70. Siendo, del orden de 140% para el hormigón HE70, mientras que para el hormigón H70 fue de 90%. Sin embargo, los valores de deformación correspondientes a la tensión máxima, son bastante comparables.

El mayor efecto del confinamiento sobre el hormigón de baja resistencia H30 frente a los hormigones de alta resistencia se puede atribuir a la disminución de la dilatación transversal durante la rotura con el aumento de resistencia. La tendencia observada en estos ensayos concuerda con los resultados obtenidos en el capítulo anterior en términos del aumento de la tensión máxima con un mayor nivel de confinamiento activo.

La Tabla 4.3 presenta los resultados de los ensayos realizados con carga sobre la sección completa. El Anexo F presenta todos los resultados de las probetas ensayadas. Se puede decir que la capacidad de carga es mayor cuando la probeta es cargada únicamente sobre la superficie de hormigón. Sólo en un caso se encontró una disminución del orden de 5% para el hormigón de baja resistencia H30, cuando es confinado con tubo de acero de 7.6 mm de espesor. Estos resultados sugieren que ocurrió menos confinamiento cuando las probetas fueron cargadas sobre toda la sección. Esto permite establecer que el grado de confinamiento es dependiente de la condición de carga, siendo mayor cuando la probeta es cargada únicamente sobre el núcleo de hormigón y usando el tubo de acero solo como restricción circunferencial.

Tabla 4.3 Resultados de la carga última de las probetas ensayadas

Serie	e	Probeta cargada únicamente sobre el hormigón	Probeta cargada sobre toda la sección
	mm	kN	kN
H30	0	614	-
	1.8	1243	1096
	4.5	2013	1875
	7.6	2577	2710
H70	0	1205	-
	1.8	1677	1615
	4.5	2353	2219
	7.6	2979	2681
HE70	0	1040	-
	1.8	1822	1722
	4.5	2477	2151
	7.6	3113	2749

Para evaluar las tensiones reales que los tubos de acero ejercen sobre el núcleo de hormigón, se calcularon las deformaciones axiales y circunferenciales de los hormigones confinados, que se presentan en las Figuras 4.11 a 4.13. Las curvas muestran el promedio de dos probetas. Se observa que la relación entre la deformación circunferencial y axial es siempre mayor que el coeficiente de Poisson del acero (es decir, 0.3) indicando la existencia de un estado biaxial de tensiones en el tubo. Esto se puede atribuir a la fricción entre el tubo y el hormigón a pesar de la utilización de una lamina de teflón de 0.1 mm de espesor entre ambas superficies.

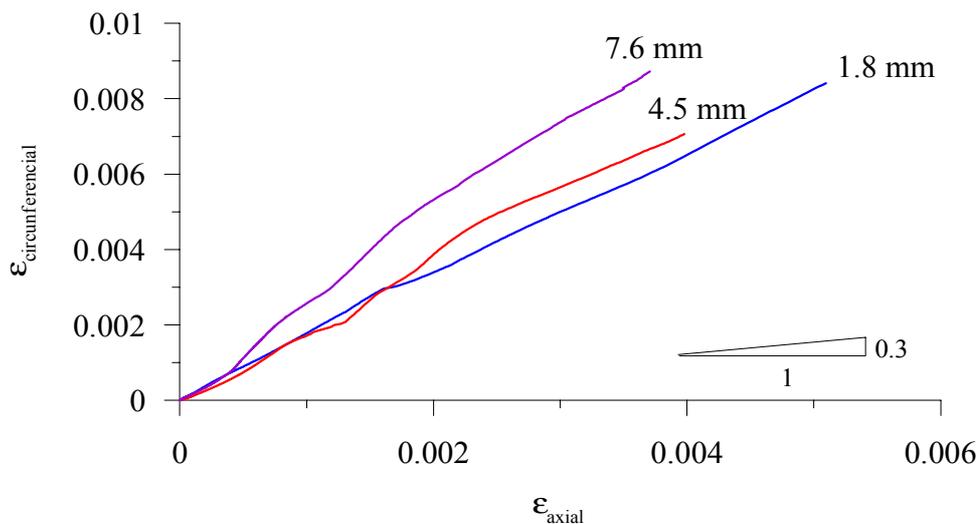


Figura 4.11 Deformaciones en el tubo de acero, hormigón H30

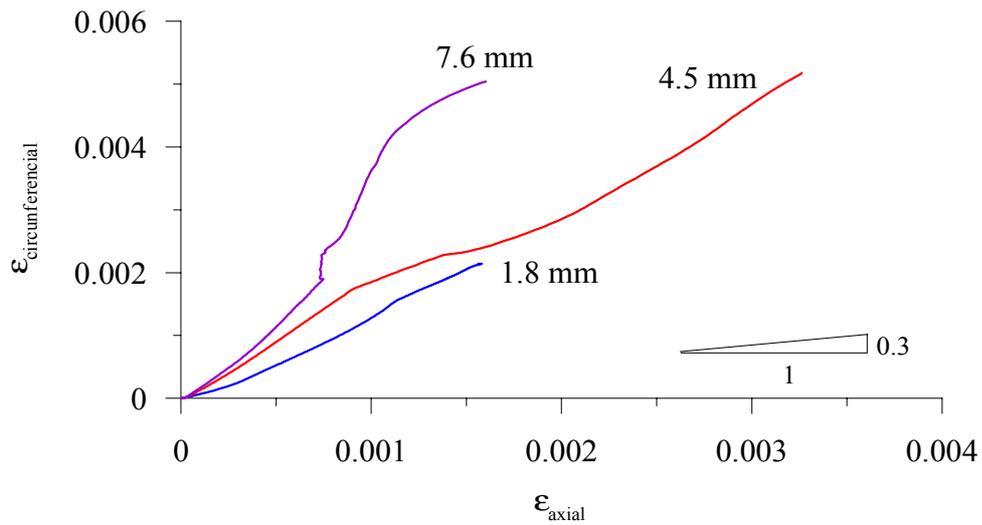


Figura 4.12 Deformaciones en el tubo de acero, hormigón H70

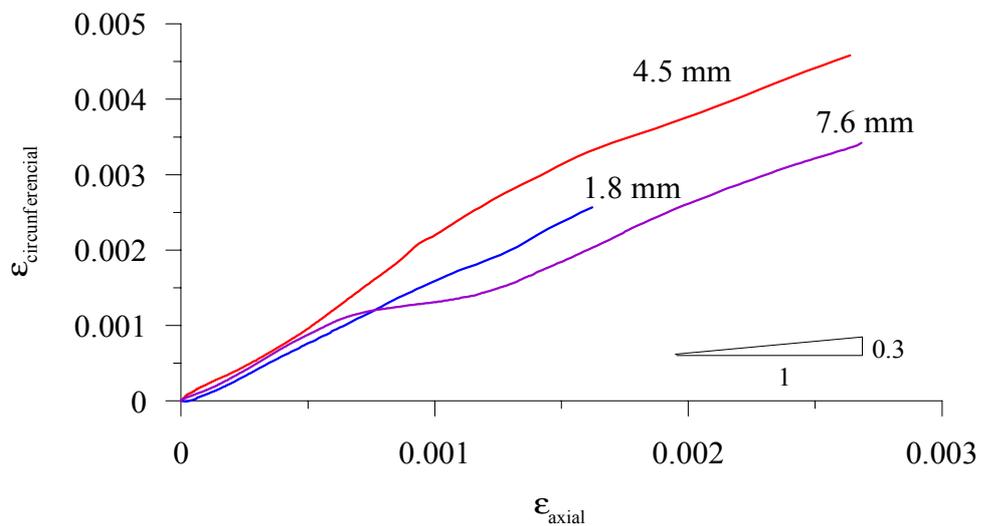


Figura 4.13 Deformaciones en el tubo de acero, hormigón HE70

Con el fin de calcular la tensión de confinamiento real sobre el núcleo de hormigón, se aplicó el criterio de von Mises basado en el registro de las deformaciones del tubo de acero. De acuerdo a este criterio, la fluencia ocurre cuando:

$$F(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f_y} \right)^2 \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 \right] = 1 \quad (4.1)$$

donde, f_y es la tensión de fluencia, y σ_x , σ_y y σ_z , son las tensiones principales. Para nuestro estudio suponemos que $\sigma_z = 0$. Aplicando la teoría de elasticidad podemos encontrar que:

$$\sigma_x = \frac{\epsilon_x E - \nu E \epsilon_y}{(1 - \nu^2)} \quad (4.2)$$

$$\sigma_y = \frac{-\epsilon_y E + \nu E \epsilon_x}{(1 - \nu^2)} \quad (4.3)$$

donde, σ_x y ϵ_x son la tensión y deformación en la dirección circunferencial, y σ_y y ϵ_y la tensión y deformación en la dirección axial. Los parámetros del material son: módulo de elasticidad $E = 200$ GPa, tensión de fluencia $f_y = 355$ MPa y coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$. Utilizando el valor de σ_x obtenido se ha calculado la tensión de confinamiento σ_3 mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x e}{r} \quad (4.4)$$

donde, e es el espesor del tubo de acero, y r el radio de la probeta de hormigón.

Los resultados de este análisis se muestran en las Figuras 4.14 a 4.16 en las que se ha graficado la relación entre el confinamiento inducido por el tubo de acero y la deformación axial del núcleo de hormigón. Y la Tabla 4.4 muestra una comparación entre los valores de tensión de confinamiento teórico y experimental. En esta tabla, e es el espesor del tubo de acero, $\sigma_{3,t}$ es la tensión de confinamiento teórico y $\sigma_{3,exp.}$ es la máxima tensión desarrollada en los ensayos. Los valores experimentales que se muestran en la tabla corresponden al promedio de dos probetas. Los valores teóricos del confinamiento se han calculado para cada espesor de tubo suponiendo que la tensión circunferencial en el tubo de acero alcanza la tensión de fluencia del acero, es decir $\sigma_x = f_y$. Los resultados son bastante evidentes y muestran que la tensión de confinamiento es menor que la asumida. Además de las figuras se nota que el aumento del confinamiento es gradual a medida que se incrementa la carga axial, siendo mas lento en el caso de los hormigones de alta resistencia.

Tabla 4.4 Tensión de confinamiento teórico y experimental

e mm	$\sigma_{3,t}$ MPa	Tipo de hormigón		
		H30 $\sigma_{3,exp.}$ MPa	H70 $\sigma_{3,exp.}$ MPa	HE70 $\sigma_{3,exp.}$ MPa
1.8	8.5	7.2	6.2	6.7
4.5	21.3	17.8	18.5	19.2
7.6	36.0	34.1	34.0	26.9

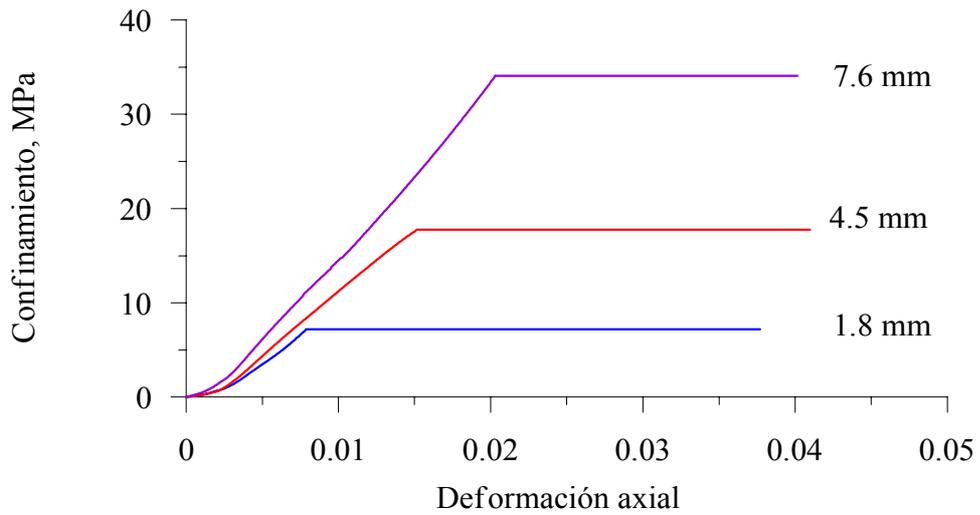


Figura 4.14 Tensión de confinamiento calculado de acuerdo al criterio de rotura de von Mises del hormigón H30 confinado con tubo de acero

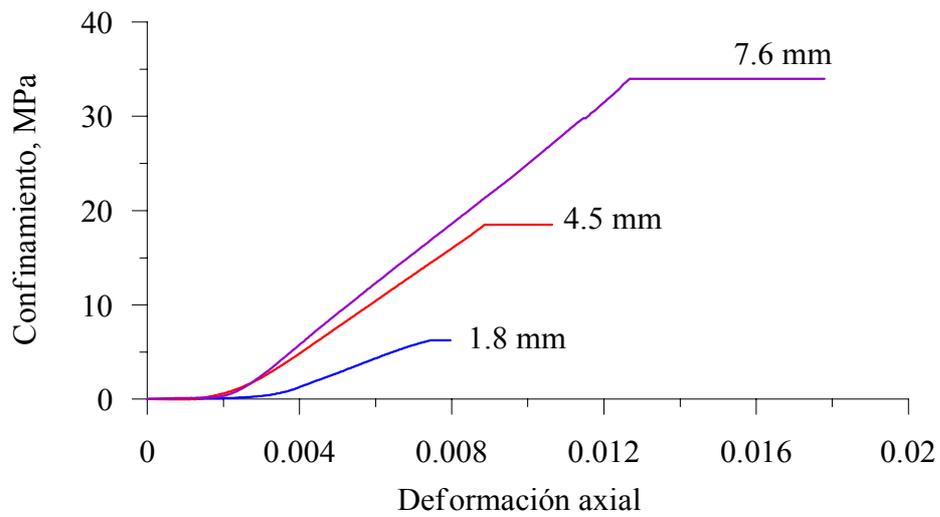


Figura 4.15 Tensión de confinamiento calculado de acuerdo al criterio de rotura de von Mises del hormigón H70 confinado con tubo de acero

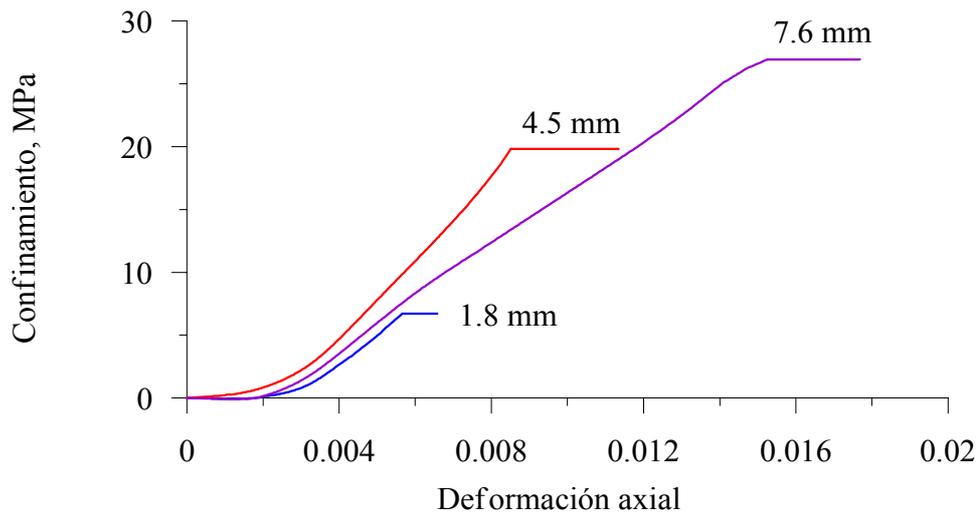


Figura 4.16 Tensión de confinamiento calculado de acuerdo al criterio de rotura de von Mises del hormigón HE70 confinado con tubo de acero

El criterio de von Mises también fue aplicado al caso de las probetas cargadas sobre toda la sección. Los resultados se muestran en la Tabla 4.5 donde se comparan las tensiones de confinamiento inducido por el tubo de acero cuando las probetas son cargadas únicamente sobre el núcleo de hormigón y sobre la sección completa. En esta tabla, e es el espesor de tubo de acero, y $\sigma_{3,exp}$ es la tensión de confinamiento cuando la aplicación de la carga es únicamente sobre el núcleo de hormigón (CNH) y sobre toda la sección (CTS).

Tabla 4.5 Tensión de confinamiento cuando las probetas son cargadas únicamente sobre la sección de hormigón y sobre toda la sección

e mm	Tipo de hormigón					
	H30		H70		HE70	
	CNH*	CTS**	CNH	CTS	CNH	CTS
	$\sigma_{3,exp}$ MPa	$\sigma_{3,exp}$ MPa	$\sigma_{3,exp}$ MPa	$\sigma_{3,exp}$ MPa	$\sigma_{3,exp}$ MPa	$\sigma_{3,exp}$ MPa
1.8	7.2	0.6	6.2	2.3	6.7	1.5
4.5	17.8	0.7	18.5	1.4	19.2	1.4
7.6	34.1	0.3	34.0	1.9	26.9	2.4

* CNH: Carga únicamente sobre el núcleo de hormigón.

** CTS: Carga sobre toda la sección.

Como se observa en la tabla los valores de tensión de confinamiento cuando el ensayo se realiza sobre el núcleo de hormigón es mayor que cuando se realiza sobre toda la sección. Estos resultados justifican los valores de carga registrados cuando las probetas son cargadas sobre la toda superficie o únicamente sobre la sección de hormigón, según se observa en la Tabla 4.3, que muestra valores menores en el caso de las probetas cargadas sobre toda la sección, debido a la menor influencia del confinamiento. Es evidente que si la probeta es cargada sobre toda la sección, el tubo de acero se expande mas que el núcleo de hormigón debido a que el coeficiente de Poisson del acero es mayor que del hormigón, lo cual también influye en proporcionar menos confinamiento.

Por otro lado, la Tabla 4.6 muestra una comparación entre los resultados de tensión máxima obtenidos experimentalmente y los valores de tensión máxima calculados mediante algunas expresiones propuestas por otros investigadores. Los valores experimentales que se muestran en la tabla corresponden al promedio de dos ensayos para el caso de la aplicación de carga únicamente sobre la superficie de hormigón. Los resultados experimentales del hormigón de alta resistencia H70 muestran gran concordancia con los obtenidos por O'Shea y Bridge (2000), cuya expresión es una modificación a la ecuación de Mander et al. (1988). O'Shea y Bridge (2000) ensayaron tubos circulares de acero de pared delgada, con espesores entre 0.86 mm y 2.82 mm, rellenos de hormigón con relaciones L/D de 3.5 en hormigones de 50, 80 y 120 MPa de resistencia. En el caso de los hormigones de baja resistencia H30 y alta resistencia HE70, los resultados experimentales obtenidos muestran gran concordancia con los obtenidos por la expresión propuesta por Attard et al. (1996), que es una ecuación para calcular la resistencia del hormigón confinado para todos los tipos de hormigón y fue generada de ensayos triaxiales en probetas de 100 × 200 mm de resistencia normal y alta.

Tabla 4.6 Comparación entre los resultados de tensión máxima obtenidos experimentalmente y calculados mediante expresiones de otros investigadores (Ver expresiones en el Anexo D)

Serie	Esesor e mm	Exp. $f'_{c\max}$ MPa	O'Shea et al., 2000 $f'_{c\max}$ MPa	Setunge et al., 1993 $f'_{c\max}$ MPa	Attard et al., 1996 $f'_{c\max}$ MPa
H30	1.8	70	64	57	70
	4.5	114	88	88	109
	7.6	146	107	137	161
H70	1.8	95	96	87	106
	4.5	133	136	124	158
	7.6	168	170	170	210
HE70	1.8	104	88	79	96
	4.5	140	126	117	146
	7.6	176	143	140	170

4.5.2 Ductilidad

Como se muestra en la Tabla 4.2, la deformación correspondiente a la tensión máxima se incrementa en función del espesor del tubo de acero de confinamiento. Además, las pendientes de los tramos descendentes (régimen post-pico) de las curvas tensión-deformación axial son menores con el incremento del espesor del tubo de acero, como se observa en las Figuras 4.3 a 4.5, lo que indica un incremento de la ductilidad.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la ductilidad puede caracterizarse por el área bajo la curva tensión-deformación axial que proporciona información de la energía de deformación acumulada en el elemento bajo carga (Sección 3.5.3, Capítulo 3). En este sentido, la Tabla 4.7 presenta los índices de tenacidad a compresión $\overline{\sigma}_c$ de los hormigones estudiados para valores correspondientes a la deformación δ_{tc} de 0.75% de la deformación y para 2 y 4 veces este valor. De esta tabla se observa que el índice de tenacidad a compresión incrementa su valor cuando se incrementa el espesor del tubo de acero. Así por ejemplo, para el hormigón H30 el índice de tenacidad para una deformación límite de 0.75% es 1.0 y 1.2 para 1.8 mm y 7.6 mm de espesor de tubo de acero. Del mismo modo, el índice de tenacidad para una deformación límite de 3.0% es 1.7 y 2.4 para los mismos espesores de tubo de acero. Los valores de índice de tenacidad calculados para el hormigón de alta resistencia H70 son ligeramente menores que en el caso del hormigón de baja resistencia H30. Así por ejemplo, el índice de tenacidad para una deformación límite de 3.0% para el H70 es 2.1, mientras que para el hormigón H30 es 2.4 para un espesor de tubo de acero de 7.6 mm.

Tabla 4.7 Índice de tenacidad de los hormigones estudiados

Serie	<i>e</i> mm	Índice de tenacidad $\overline{\sigma}_c$		
		$\delta_{tc} = 0.75\%$	$\delta_{tc} = 1.50\%$	$\delta_{tc} = 3.00\%$
H30	0	-	-	-
	1.8	1.04	1.42	1.69
	4.5	1.15	1.63	2.21
	7.6	1.19	1.70	2.44
H70	0	-	-	-
	1.8	1.00	1.13	1.16
	4.5	1.11	1.50	1.68
	7.6	1.21	1.71	2.08
HE70	0	-	-	-
	1.8	1.19	1.36	1.40
	4.5	1.22	1.76	2.00
	7.6	1.41	1.96	2.43

4.5.3 Cálculo de la carga máxima de la sección mixta

Para el cálculo de la carga máxima de una sección cilíndrica compuesta de hormigón confinado con tubo de acero, el Eurocódigo considera la contribución de cada material, según la expresión siguiente:

$$N_u = A_s f_y + A_c f_{ck} \quad (4.5)$$

donde N_u es la carga máxima de la sección compuesta, A_s y A_c las áreas de acero y hormigón, respectivamente, f_y la tensión de fluencia del acero y f_{ck} la resistencia del hormigón.

Por otro lado, Good (1994) calcula la carga máxima de probetas cilíndricas de sección compuesta mediante las siguientes expresiones de equilibrio:

$$N_u = \sigma_{lc} A_c + \sigma_{ls} A_{ls} \quad (4.6)$$

$$C = -\frac{P.D}{2.e} \quad (4.7)$$

donde σ_{lc} y σ_{ls} es la tensión longitudinal en el hormigón y acero, respectivamente; A_{ls} es el área de acero, C es la tensión circunferencial en el tubo de acero, P la tensión en la interface, D el diámetro interior del tubo de acero y e su espesor.

Aplicando el criterio de Tresca para acero o de la mayor tensión tangencial, que establece que el material en un punto comienza a plastificarse cuando la máxima tensión tangencial en dicho punto alcanza el mismo valor que la máxima tensión en el ensayo de tracción simple, se tiene que:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2} f_y \quad (4.8)$$

$$f_y = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{ls} - C \quad (4.9)$$

de donde:

$$\sigma_{ls} = f_y + C \quad (4.10)$$

Asimismo, sabemos que el núcleo de hormigón esta sometido a un estado de tensiones triaxial dentro del tubo de acero, y de acuerdo al criterio de rotura de Mohr-Coulomb, aplicado a las probetas confinadas en la célula triaxial, las tensiones principales máximas pueden relacionarse con la presión de confinamiento mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_o + tg\alpha.\sigma_3 \quad (4.11)$$

reemplazando las expresiones (4.10) y (4.11) en la expresión (4.6), se tiene que:

$$N_u = (\sigma_o + tg\alpha.\sigma_3).A_c + (f_y + C).A_{ls} \quad (4.12)$$

Si consideramos la máxima tensión circunferencial en el acero, como:

$$C = -f_y \quad (4.13)$$

Se tiene que la carga máxima en el hormigón de sección compuesta está definida como:

$$N_u = [\sigma_o + tg\alpha.\sigma_3]A_c \quad (4.14)$$

Finalmente, los resultados de los ensayos triaxiales del capítulo anterior se ajustan bastante bien con la expresión propuesta por Setunge et al. (1993), que viene dada por:

$$\sigma_1 = \sigma_o + 3.\sigma_3 \quad (4.15)$$

Si comparamos las ecuaciones (4.11) y (4.15) y reemplazándola en la ecuación (4.14) se tiene que la carga última de la sección compuesta viene dada por:

$$N_u = [\sigma_o + 3.\sigma_3]A_c \quad (4.16)$$

En esta expresión, σ_o es la tensión del hormigón sin confinar y σ_3 es la tensión de confinamiento real (experimental) cuyos valores se muestran en la Tabla 4.4.

La Tabla 4.8 presenta los resultados de carga última de las probetas cilíndricas de sección compuesta de hormigón confinado con tubo de acero. En esta tabla, e es el espesor del tubo de acero, N_{uExp} es la carga última, promedio de dos ensayos, de la sección compuesta obtenida experimentalmente, N_{uEuroc} es la carga última calculada según el Eurocódigo (ecuación 4.5), y N_{uEcuac} es la carga última calculada por la ecuación (4.15) aplicada a los hormigones estudiados. Cabe mencionar que los valores resistencia característica f_{ck} fueron calculados mediante la siguiente expresión:

$$f_{ck} = f_{cexp} - 8 \quad (4.17)$$

donde, f_{cexp} es la resistencia sin confinar de los hormigones estudiados.

Como se aprecia en la tabla, los valores encontrados con la expresión del Eurocódigo son bastante inferiores a los valores experimentales, como es de esperar. Así por ejemplo, para el hormigón H30 confinado con tubo de acero de 1.8 mm de espesor, la carga última calculada por la expresión de Eurocódigo es 782 kN, mientras que la experimental es 1243 kN. Del mismo modo, para los hormigones de alta resistencia H70 y HE70 confinados con tubo de acero de 1.8 mm la carga última calculada por la expresión del Eurocódigo, es 1365 kN y 1188 kN, mientras que la experimental fue 1677 kN y 1834 kN, respectivamente. Los valores obtenidos con la ecuación del Eurocódigo son un 20% a 40% menores que los valores experimentales, mostrando el carácter conservador del Eurocódigo. Por el contrario, los valores de carga última obtenidos mediante la expresión propuesta (ecuación 4.16) son bastante comparables a los resultados experimentales. Por ejemplo, para el hormigón H30 confinado con tubo de acero de 7.6 mm la carga última calculada por la expresión propuesta es 2426 kN, mientras que la experimental es 2577 kN, y para el hormigón de alta resistencia H70 confinada con este mismo espesor de tubo, la carga última calculada por la expresión propuesta es 3004 kN, mientras que la experimental es 2978 kN.

Tabla 4.8 Carga última de los hormigones confinados con tubo de acero

Serie	e mm	N_{uExp} kN	N_{uEuroc} kN	$\frac{N_{uEuroc}}{N_{uExp}}$	N_{uEcuac}	$\frac{N_{uEcuac}}{N_{uExp}}$
					kN	
H30	1.8	1243	782	0.63	1000	0.80
	4.5	2013	1252	0.62	1562	0.78
	7.6	2577	1813	0.70	2426	0.94
H70	1.8	1677	1365	0.81	1530	0.91
	4.5	2353	1836	0.78	2182	0.93
	7.6	2978	2396	0.80	3004	1.01
HE70	1.8	1834	1188	0.65	1397	0.76
	4.5	2477	1677	0.68	2060	0.83
	7.6	3113	2237	0.72	2469	0.79

4.6 CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento mecánico del hormigón sin confinar y el hormigón confinado con tubo de acero. Los estudios se realizaron en hormigón de baja y alta resistencia, confinados con tres espesores de tubo de acero diferentes, determinándose sus propiedades mecánicas y su comportamiento tensión-deformación. Además, se calcularon los parámetros para establecer la influencia del confinamiento sobre la ductilidad.

Las principales conclusiones a las que se llegó fueron las siguientes:

El confinamiento con tubo de acero, incrementa significativamente la capacidad de resistencia y deformación del hormigón, mejorando sustancialmente la ductilidad. Sin embargo, este efecto es más notorio en el hormigón de baja resistencia.

En el hormigón de baja resistencia H30, cuando es confinado con tubo de acero de 7.6 mm de espesor, la resistencia se incrementó en el orden de 4 veces la resistencia del hormigón sin confinar. En el caso de los hormigones de alta resistencia HE70 y H70, para el mismo espesor de tubo de acero, los incrementos fueron del orden de 3 y 2.5 veces, respectivamente.

El incremento de la deformación correspondiente a la tensión máxima es notable. En el hormigón de baja resistencia H30, confinado con tubo de acero de 7.6 mm de espesor, la deformación máxima se incrementó en el orden de 19 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar. Para los hormigones de alta resistencia HE70 y H70, para el mismo espesor de tubo de acero, los incrementos fueron del orden de 9 y 8 veces, respectivamente.

El confinamiento es dependiente de la condición de carga. Se alcanzaron mayores valores de carga cuando las probetas fueron cargadas únicamente sobre la superficie de hormigón y usando el tubo de acero como una restricción circunferencial.

La ductilidad de los hormigones confinados calculada mediante valores que relacionan áreas bajo la curva tensión-deformación axial se incrementa con el espesor del tubo de acero.

Se han propuesto expresiones para calcular la carga última de la sección compuesta de hormigón confinado con tubo de acero. Los valores obtenidos con estas expresiones son bastante similares a los valores obtenidos experimentalmente.

El aspecto de las probetas después de los ensayos presenta, en la mayoría, un tipo de fallo caracterizada por el pandeo local. En el caso de los ensayos con carga aplicada únicamente en la sección de hormigón, en las probetas confinadas con tubos de acero de menor espesor, el pandeo se localiza en uno de los extremos de la probeta. A medida que se incrementa el espesor del tubo de acero, el pandeo se presenta hacia el centro de la altura de la probeta. En el caso de los ensayos con aplicación de carga sobre toda la sección, el pandeo se localiza en un extremo de la probeta, siendo más notorio en las probetas de menor espesor.

Aún cuando la resistencia del hormigón de alta resistencia H70 sin confinar es mayor que el hormigón de alta resistencia HE70, que incluye un aditivo reductor de retracción, el comportamiento tensión-deformación axial de los respectivos hormigones confinados fue bastante similar.