



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 3

HORMIGÓN CONFINADO POR PRESIÓN HIDROSTÁTICA

3.1 INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el programa de ensayos del capítulo anterior, en el presente capítulo se presentan los ensayos experimentales de probetas cilíndricas de hormigón de baja y alta resistencia confinadas hidrostáticamente en una célula triaxial y sometidas a compresión axial. Las variables experimentales son el tipo de hormigón y los niveles de presión hidrostática. Las resistencias características de los hormigones estudiados son 25 y 60 MPa.

Los objetivos principales de este capítulo son caracterizar el comportamiento del hormigón sometido a confinamiento activo, mediante ensayo a compresión axial de probetas cilíndricas confinadas dentro de una célula triaxial. Asimismo, evaluar la influencia del tipo de hormigón sobre el comportamiento a compresión triaxial, y hacer una comparación de los resultados experimentales con los resultados obtenidos mediante expresiones existentes en la literatura que relacionan la resistencia confinada con la presión de confinamiento.

Para conseguir los objetivos de este capítulo, en primer lugar se hace una revisión bibliográfica que permite establecer el estado actual de conocimientos del hormigón sometido a compresión triaxial, seguido de un programa de los ensayos realizados, presentación y análisis de los resultados obtenidos, comparación con resultados de otras investigaciones, y las conclusiones particulares del estudio.

3.2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En años recientes se ha incrementado el empleo de hormigones de altas prestaciones, entre los cuales, es evidente el empleo de hormigones con resistencia superior a los 60 MPa, considerados como hormigones de alta resistencia. Si bien es cierto que, la resistencia a compresión axial, es la principal propiedad empleada en el diseño de elementos de hormigón, muchas situaciones de diseño práctico requieren la predicción del comportamiento del hormigón bajo estado de tensión triaxial, tales como anclajes de refuerzo pretensado, pilotes de puentes, columnas de edificios de gran altura, reactores de hormigón reforzado, estructuras hidráulicas, y estructuras marinas, entre otras.

Aunque el confinamiento ha sido utilizado durante muchos años, sólo recientemente se ha estudiado extensivamente para cuantificar los incrementos de ductilidad y resistencia debido a este efecto. Por otro lado, la determinación de la relación constitutiva del hormigón requiere información experimental correspondiente a la respuesta tensión-deformación bajo distintos estados multiaxiales de tensiones.

En los ensayos triaxiales, la aplicación de la presión de confinamiento a la probeta implica requisitos rigurosos sobre la capacidad de carga y rigidez de la máquina de ensayo, aún para hormigones con resistencias dentro del rango normal. Estos requisitos llegan a ser más pronunciados con resistencias a compresión más elevadas. Por esta razón, la mayoría del trabajo experimental se relaciona con hormigón de resistencia normal.

Una extensa búsqueda bibliográfica indica la disponibilidad de cierto número de estudios experimental y teórico sobre el hormigón sometido a compresión triaxial. Sin embargo, la mayoría de estos estudios están relacionados con probetas cúbicas de tamaños con dimensiones inferiores a 100 mm (Mills y Zimmerman, 1970, 1971; Launay y Gachon, 1970, 1971; Linse, 1973; Gerstle et al., 1980; Wang et al., 1987) y probetas cilíndricas con dimensiones inferiores a 150 × 300 mm (Richart et al., 1928, 1929; Gardner, 1969; Palaniswamy y Shah, 1974; Smith et al., 1989; Lahlou et al., 1992; Chern et al., 1992; Setunge et al., 1993; Xie et al., 1995; Attard y Setunge, 1996; Imran y Pantazopoulou, 1996; Ansari y Li, 1998; Li y Ansari, 1999; Candappa et al., 2001). La información de ensayos en probetas cilíndricas de 150 × 300 mm es limitada (Balmer, 1952; Belloti y Rossi, 1991; Sfer et al., 2002).

En la mayoría de estos estudios las resistencias de los hormigones oscilan entre 5 y 30 MPa y los niveles de confinamiento fueron bajos (Richart et al., 1928, 1929; Balmer, 1952; Gardner, 1969; Palaniswamy y Shah, 1974; Mills y Zimmerman, 1970, 1971; Linse, 1973; Wang et al., 1987; Chern et al., 1992). Existe información de ensayos realizados en hormigones de alta resistencia, del orden de los 50 a 130 MPa, con presiones de confinamiento hasta 20 MPa (Belloti y Rossi, 1991; Lahlou et al., 1992; Setunge et al., 1993; Xie et al., 1995; Attard y Setunge, 1996; Imran y Pantazopoulou, 1996; Ansari y Li, 1998; Li y Ansari, 1999; Candappa

et al., 2001). Por otro lado, existen trabajos sobre probetas sometidas a tensiones de confinamiento del orden de 60 a 80 MPa (Chern et al., 1992; Xie et al., 1995; Ansari y Li, 1998; Li y Ansari, 1999). Uno de los trabajos más completos es de Dahl (1992), en el cual se ha estudiado el comportamiento de hormigones con un amplio rango de resistencia a compresión (10-110 MPa) sometidos a presiones de confinamiento de 0 a 140 MPa.

Por otro lado, de su información experimental, Richart et al. (1928) fueron los primeros en proponer una expresión que relaciona la resistencia del hormigón confinado con la presión de confinamiento; así como expresiones para determinar la deformación máxima del hormigón confinado. La tendencia general indica que el confinamiento incrementa la resistencia y ductilidad, siendo mayor o menor este incremento en función de la resistencia a compresión de la probeta sin confinar. Richart et al. (1929) también propusieron una equivalencia entre las resistencias del hormigón con confinamiento activo y del hormigón con confinamiento pasivo a base de espirales de acero. Sus resultados y recomendaciones formaron por muchos años la base de los requisitos para el confinamiento con acero de la instrucción ACI 318. Desde aquel entonces se han propuesto diversas expresiones con tendencias similares (Balmer, 1949; Newman y Newman, 1971; Hobbs y Pomeroy, 1974). Otros proponen expresiones con tendencias similares para bajos niveles de confinamiento y con resistencias mayores a altos niveles de confinamiento (Imran y Pantazopoulou, 1996).

Es evidente que recientemente, algunos investigadores han insistido en conocer el comportamiento completo tensión-deformación (ascendente y descendente) del hormigón para obtener un modelo constitutivo adecuado. Esta falta de información es mas pronunciada en el caso de los hormigones de alta resistencia (resistencias mayores a 40 MPa). En este sentido, la presente investigación permitirá complementar e incrementar la información existente de curvas tensión-deformación completa para hormigones de baja y alta resistencia bajo confinamiento lateral activo.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.3.1 Programa de ensayos

Se ensayaron probetas cilíndricas de hormigón de 150 × 300 mm a diferentes niveles de presión de confinamiento. Las resistencias de los hormigones fueron aproximadamente iguales a 30 y 70 MPa. En cada caso se ensayaron 2 probetas. Las probetas corresponden a las fabricadas en la primera etapa (Tabla 2.3, Capítulo 2). La Tabla 3.1 presenta, en detalle, el alcance del programa de ensayos.

Tabla 3.1 Ensayos de compresión triaxial: Programa de ensayos

Presiones de confinamiento (MPa)	Tipo de hormigón		
	Baja resistencia	Alta resistencia	
		H30	H70
0	✓	✓	✓
7	✓	✓	✓
10		✓	
14		✓	✓
17	✓		
28	✓	✓	
35	✓	✓	✓
40		✓	✓
45		✓	
50		✓	✓

3.3.2 Ensayo de hormigón sin confinar

Las probetas fueron ensayadas por control de desplazamiento circunferencial, para lo cual se colocó una cadena con extensómetro circunferencial en el centro de la probeta (Ver Figura 2.3, Capítulo 2). El procedimiento de aplicación de carga fue el siguiente: se pone en marcha la prensa con el control de desplazamiento del actuador; enseguida se aplica una pequeña carga axial sobre la probeta (del orden de 15 a 20 kN) para asegurar el contacto con los platos de carga. De esta manera se consigue una deformación circunferencial suficiente para alcanzar la sensibilidad del transductor circunferencial. En esta posición se traslada el control al del extensómetro circunferencial, quedando lista para poner en marcha el ensayo, a la velocidad previamente establecida. El ensayo finaliza al alcanzar la capacidad máxima del extensómetro circunferencial. El programa de adquisición de datos registra durante todo el ensayo los valores carga y desplazamientos, registrados por la célula de presión y los transductores de desplazamiento tipo LVDT y las galgas extensométricas.

El proceso de la obtención de las curvas tensión-deformación axial es como sigue (Glavind, 1992): la tensión se calcula dividiendo la carga registrada por el área de la sección transversal de la probeta. La deformación axial consiste en la deformación media de las galgas pegadas directamente sobre la probeta hasta el máximo y el promedio de los desplazamientos totales entre los platos a través de los LVDTs dividido por la altura de la probeta en el post-pico.

Se dibujan las curvas tensión-deformación con los resultados obtenidos de los LVDTs y las galgas extensométricas. En el caso de la gráfica correspondiente a la curva tensión-deformación axial obtenida mediante los registros de los LVDTs se presenta una típica no linealidad de la curva en su parte inicial, atribuida a deformaciones localizadas debido al contacto inicial entre la probeta y los platos, y al acomodamiento del sistema de carga. Esta

no linealidad se corrige mediante una extrapolación de la parte lineal que se muestra en la Figura 3.1 y consiste en lo siguiente: se extrapola la parte lineal siguiente hasta el eje de las abscisas, con lo que se obtiene un nuevo valor de origen (Punto B). Este punto se traslada al origen (Punto O), con lo que se obtiene el tramo inicial lineal que parte del origen. Este procedimiento se sigue para cada uno de los LVDTs. Posteriormente, se calcula el promedio de los registros de los 3 LVDTs, y se grafican las curvas tensión-deformación axial. En el caso de las galgas extensométricas (deformaciones axiales y transversales), y con el fin de que los valores coincidan con el origen se hace la correspondiente corrección. Igualmente, se calculan los promedios y se grafican las curvas tensión-deformación.

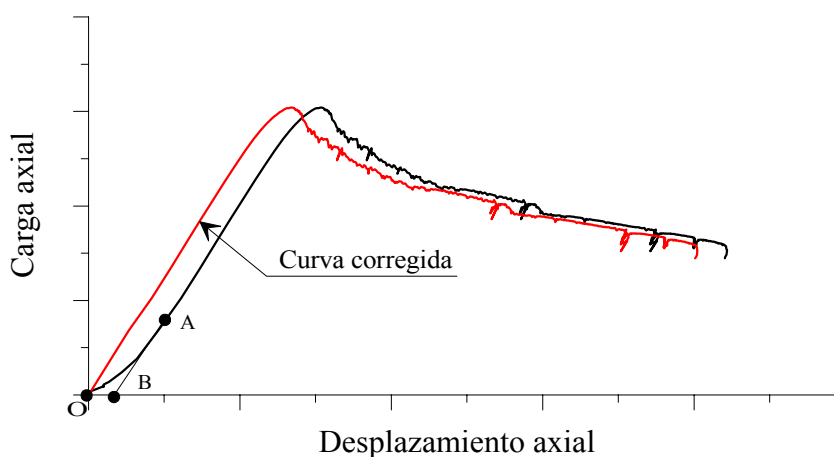


Figura 3.1 Curva carga-desplazamiento axial, sin y con la corrección del desplazamiento inicial

3.3.3 Ensayo de hormigón confinado en célula triaxial

Todos los ensayos confinados fueron realizados con velocidad constante de desplazamiento del pistón de la prensa igual a 0.005 mm/seg. A continuación se presenta el procedimiento seguido de la puesta en marcha del ensayo (Ver detalles de la célula triaxial en las Figuras 2.2 y 2.4, Capítulo 2).

Previo al ensayo se sellan los poros existentes en las probetas con una pasta de cemento/agua, dejándose fraguar durante un día. Después se coloca sobre la superficie de la probeta una camisa de neopreno de 1 mm de espesor para evitar la penetración de fluido durante la presurización. Adicionalmente se coloca una segunda camisa de butilo de 5 mm de espesor que evita la perforación del neopreno durante el ensayo. La altura de las camisas de neopreno y de butilo es de 360 mm, es decir, 60 mm mayor que la altura de la probeta. De estos 60 mm, 30 mm sobresalen de la parte superior y 30 mm de la parte inferior de la probeta, que sirven para su fijación en el proceso del montaje en la célula triaxial. En esta condición se coloca la

probeta sobre el pedestal rígido de la célula triaxial. La probeta queda sobre una placa circular de 150 mm de diámetro y 30 mm de espesor. Para minimizar la fricción entre el plato de carga y la probeta de hormigón, se coloca una combinación de teflón/grasa/teflón en la interface (con láminas de teflón de 0.1 mm de espesor). Enseguida se coloca sobre la parte superior de la probeta una placa idéntica a la inferior sobre la cual está apoyada, es decir, 150 mm de diámetro y 30 mm de espesor. Previo a la fijación de las probetas, se coloca una capa de silicón sobre el perímetro de las placas con el fin de asegurar la hermeticidad y evitar el paso del aceite durante el llenado y presurización de la célula. Se fija la probeta a las placas colocando dos abrazaderas metálicas en la parte superior y dos en la parte inferior. Una de ellas se coloca sobre el hormigón y la otra sobre la placa, asegurando así la fijación de todo el conjunto. Sobre este conjunto montado, se coloca la rótula interior sobre la cual cargará el pistón de la célula triaxial.

Posteriormente se coloca un anillo de caucho y empaque de latón que evitan el paso del aceite hacia la parte inferior de la célula. Finalmente, se coloca la campana cilíndrica y se procede a cerrar la célula triaxial mediante los anillos abrazadera, y se traslada todo el conjunto a la máquina de ensayo, a partir del cual se aplica la carga axial. La carga axial de la máquina de ensayo se transmite a la probeta a través del pistón que pasa por la parte superior de la célula.

Una vez montado el equipo de presurización, se procede al llenado de la célula triaxial con aceite. El ingreso del aceite se hace por la válvula inferior (17) (Figura 2.2, Capítulo 2) de la célula y el control del llenado se hace a través de dos válvulas ubicadas en la parte superior de la cámara principal, que están ubicadas una encima de la otra. Primero se llena hasta la primera válvula (14) (Figura 2.2, Capítulo 2), lo que se consigue cerrando la válvula (13) (Figura 2.2, Capítulo 2) ubicada en la parte superior mientras se mantiene abierta la válvula inferior. Cuando se observa que sale aceite por la primera válvula y cuando desaparecen las burbujas, se asegura que la primera parte de la célula está llena de aceite. Enseguida se cierra esta válvula y se abre la segunda, y se repite el mismo procedimiento anterior llenando de aceite toda la cámara. En esta operación, también se observa como el pistón de la célula triaxial sube hasta su máxima posición. La combinación del ascenso máximo del pistón y la observación que ya no salen burbujas de aceite por la segunda válvula, asegura el llenado total con aceite de la célula triaxial, cerrando en ese momento la segunda válvula y quedando lista para el ensayo. La Figura 2.4 (Capítulo 2) presenta la disposición de la célula triaxial lista para el ensayo de compresión.

La Figura 3.2 muestra un esquema de un ensayo triaxial convencional. La realización del ensayo consiste en lo siguiente: puesta en marcha la prensa, se aplica una pequeña carga axial (del orden de 15 a 20 kN) sobre el pistón externo de la célula triaxial. Esto permite sensibilizar los instrumentos de medición, principalmente la carga y los LVDTs que están colocados en la parte externa y superior de la célula triaxial. En esta posición se inicia la aplicación de la presión de confinamiento mediante un equipo de presurización. El sistema queda listo para la aplicación de carga, a la velocidad previamente establecida, en el instante

que se alcanza la presión de confinamiento σ_3 deseada. Esta presión de confinamiento se mantiene constante durante todo el ensayo. El ensayo finaliza al alcanzar la capacidad máxima de desplazamiento de los LVDTs.

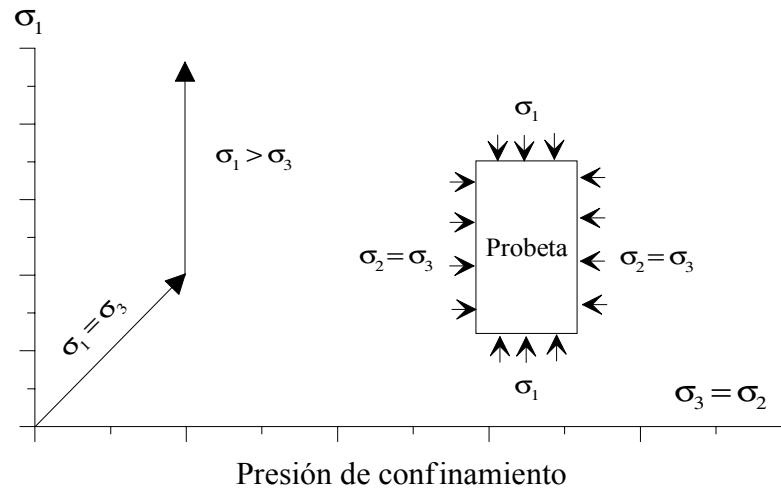


Figura 3.2 Esquema de ensayo triaxial

El sistema de adquisición de datos registra, durante todo el ensayo los valores de carga, presión de confinamiento y desplazamientos totales medidos a través de los LVDTs. La Tabla 3.2 muestra un detalle de los datos proporcionados por el sistema de adquisición de datos. La columna A muestra la presión de confinamiento aplicada y las columnas B, C y D los desplazamientos totales del sistema, es decir, la suma del desplazamiento del pistón de la célula triaxial y el desplazamiento de la probeta de hormigón. Cuando se alcanza la presión de confinamiento deseada σ_3 , se inicia la aplicación de la compresión axial, a partir de la cual se registran los valores de carga, como se muestra en la columna E. Nótese que los valores σ_3 permanecen constantes durante el ensayo.

Para la obtención de las curvas tensión-deformación axial, en primer lugar es necesario calcular la carga axial total a la que está sometida la probeta. Para esto se multiplica los valores de la presión de confinamiento σ_3 aplicada por el área de la sección transversal de la probeta de hormigón. Estos valores se suman a los valores de carga axial (P) adicional aplicada por el pistón de la prensa mostrados en la columna E. Así la curva carga-desplazamiento axial queda formada por dos tramos: un tramo inicial lineal correspondiente a la aplicación de la presión de confinamiento y un segundo tramo correspondiente al ensayo de compresión.

Para obtener los desplazamientos de la probeta de hormigón es necesario hacer una corrección debido a la deformación del pistón de la célula triaxial. Esta deformación se calcula para cada valor de carga registrada utilizando los siguientes datos del pistón: diámetro (100 mm), longitud (350 mm) y módulo de elasticidad del acero (206 GPa). Se resta de los valores de desplazamiento total medidos para obtener los desplazamientos de la probeta.

Tabla 3.2 Datos típicos registrados por el sistema de adquisición de datos

PROBETA: TRIAXIAL3-4				
Presión	LVDT			Carga
σ_3	1	2	3	P
MPa	mm	mm	mm	Tm
A	B	C	D	E
0	0	0	0	0
1.06	0.01267	0.0195	0.01762	0
4.13	0.0384	0.05783	0.05767	0
8.41	0.0723	0.1044	0.10717	0
10.15	0.08617	0.1236	0.12652	0
20.49	0.16507	0.23738	0.23062	0
25.09	0.1854	0.26078	0.2538	0
30.75	0.21577	0.29385	0.28897	0
34.32	0.24465	0.32168	0.32872	0
34.94	0.249	0.32528	0.33367	0
36.09	0.2502	0.32565	0.33337	0
36.02	0.25492	0.33173	0.34087	0.43
35.9	0.36592	0.45525	0.4584	1.09
35.77	0.3897	0.49268	0.47835	2
35.26	0.42892	0.55005	0.5073	4
35.14	0.44032	0.56295	0.52477	5.02
34.96	0.5295	0.62775	0.58792	10.42
34.98	0.63997	0.7455	0.71625	20.56
34.94	0.855	0.9498	0.92242	40.2
34.96	1.06035	1.15095	1.1343	60.48
34.97	1.26105	1.34963	1.34302	80.5
34.98	1.4706	1.5594	1.56352	100.65
34.93	1.69905	1.78868	1.80315	120.88
34.96	1.94002	2.03228	2.05657	140.04
34.96	2.23132	2.32718	2.36182	160.18
34.96	2.5785	2.68005	2.72542	180.36
34.96	3.00142	3.11078	3.16635	200.48
34.97	3.53392	3.65768	3.72165	220.31
35.21	4.28437	4.4337	4.50082	240.39
34.91	4.85505	5.02815	5.09182	250.24

Presión de Confinamiento, σ_3

Durante el ensayo, σ_3 : Constante

Inicio de la compresión adicional

La Figura 3.3 muestra una curva carga-desplazamiento axial típica de un ensayo triaxial. Como en el caso del ensayo del hormigón sin confinar, existe una no linealidad cuando se inicia el ensayo de compresión, debido a deformaciones y acomodamiento inicial del sistema de carga, que se corrige mediante el proceso de extrapolación explicado en el punto anterior. En este caso el nuevo valor de origen corresponde al valor de la presión de confinamiento y su correspondiente desplazamiento. Este procedimiento se sigue para los tres LVDTs, se calcula los promedios y se grafican las curvas tensión-deformación axial.

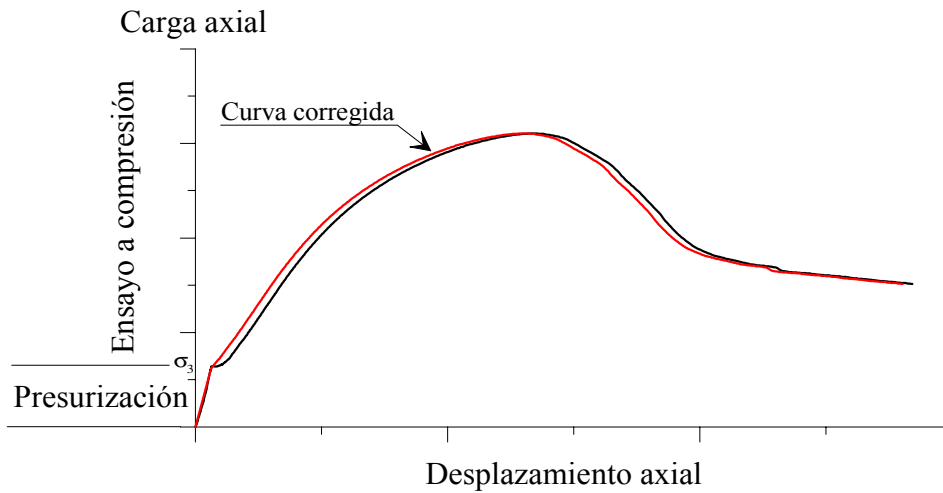


Figura 3.3 Curvas carga-desplazamiento axial del ensayo triaxial sin y con corrección del desplazamiento inicial

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Comportamiento en compresión uniaxial

Bajo compresión uniaxial, el modo de rotura de los hormigones de baja (H30) y alta resistencia (H70 y HE70) ensayados, presenta una fisuración típica, caracterizada por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga, como se muestra en el esquema de la Figura 3.4. El Anexo A presenta un registro fotográfico del aspecto de las probetas después de los ensayos.

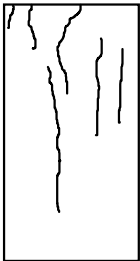
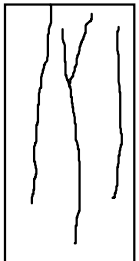
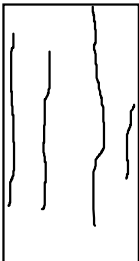
H30	H70	HE70
		

Figura 3.4 Esquema del modo de rotura de las probetas ensayadas

La Figura 3.5 muestra el comportamiento tensión-deformación axial de los hormigones de baja (H30) y alta resistencia (H70 y HE70) ensayados a compresión axial, donde las curvas corresponden al promedio de dos ensayos. El Anexo A presenta las curvas tensión-deformación de las probetas ensayadas. Como se aprecia en la figura, existe una marcada diferencia en el comportamiento tensión-deformación axial entre ambos hormigones, caracterizada por una mayor pendiente en el tramo inicial de la curva y un rápido descenso de la carga después de alcanzar el valor máximo en el caso del hormigón de alta resistencia, en comparación con el hormigón de baja resistencia. Si consideramos que la ductilidad está asociada a la capacidad de soportar deformaciones sin pérdida sustancial en su capacidad de carga, se puede decir que el hormigón de alta resistencia tiene menor ductilidad, en consecuencia, mayor fragilidad, como se observó en los ensayos realizados.

En general, el comportamiento tensión-deformación de los hormigones de alta resistencia (H70 y HE70) fue similar, sin embargo, se observó una disminución significativa del valor máximo de la tensión en el caso del hormigón HE70, que incluyó en su composición un aditivo reductor de retracción.

La Tabla 3.3 presenta las propiedades mecánicas de los hormigones estudiados, bajo condiciones de carga uniaxial. En esta tabla, f'_c es la resistencia a compresión; E_c es el módulo de elasticidad en compresión; ϵ_c es la deformación correspondiente a la tensión máxima, y μ es el coeficiente de Poisson. Los resultados presentados corresponden al promedio de dos ensayos. El Anexo A presenta los resultados de todas las probetas ensayadas.

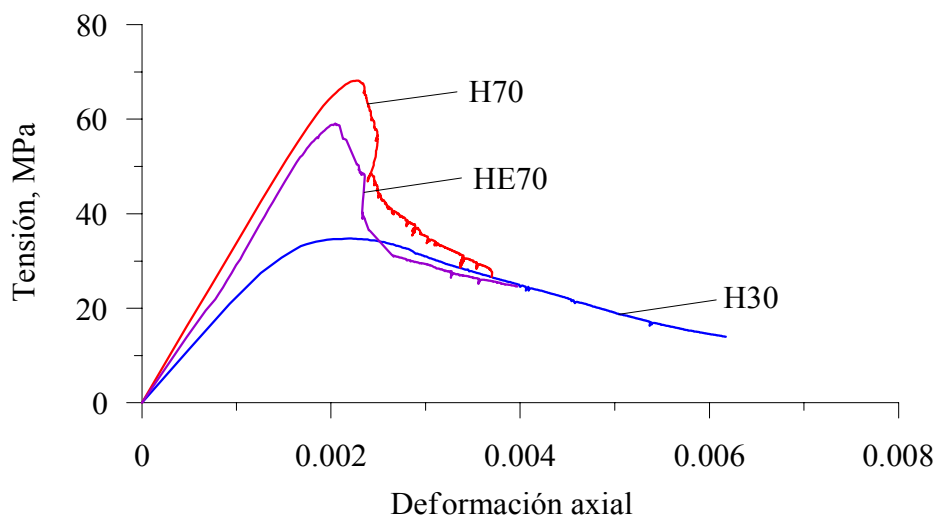


Figura 3.5 Comportamiento tensión-deformación uniaxial de los hormigones estudiados

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas de los hormigones sin confinar estudiados

Propiedad	Tipo de hormigón		
	H30	H70	HE70
f'_c , MPa	34.7	68.2	59.2
E_c , GPa	22.9	33.7	30.4
ϵ_c , $\mu\epsilon$	2190	2250	2030
μ	0.22	0.26	0.19*

* Un solo valor

3.4.2 Comportamiento en compresión triaxial

Bajo compresión triaxial, el modo de rotura de los hormigones de baja (H30) y alta resistencia (H70 y HE70) ensayados presenta una fisuración de tipo cortante, que se manifiesta en las probetas ensayadas por la grieta en diagonal a lo largo de toda la probeta, como se muestra en el esquema de la Figura 3.6. Bajo compresión uniaxial, la fractura ocurrió por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga. Al contrario, en este caso, la presión lateral de confinamiento parece prevenir la ocurrencia de este patrón de grietas, y causa que las probetas fallen en modo de corte. Los esquemas mostrados en la Figura 3.6 incluyen la fisuración observada en la dirección longitudinal y el aspecto de las bases de las probetas después de los ensayos. En todos los casos los esquemas corresponden a la base inferior de la probeta, excepto cuando se indica lo contrario. No se muestra la cara opuesta debido a que no se observó fisuración alguna. Observando los extremos de las probetas ensayadas, se puede decir que existe una tendencia a la rotura en dos a tres piezas. Similares resultados fueron observados por Rutland y Wang (1997), quienes ensayaron probetas cilíndricas de 50×100 mm sometidas a diferentes tensiones de confinamiento, entre 0 y 56 MPa. El Anexo B presenta los esquemas del aspecto de todas las probetas después de los ensayos.

Las Figuras 3.7 a 3.9 muestran el comportamiento tensión-deformación axial de los hormigones de baja (H30) y alta resistencia (H70 y HE70) ensayados a compresión triaxial, donde las curvas corresponden al promedio de dos ensayos, excepto en los casos donde se ensayó sólo una probeta (ver Tabla 3.4). En estas figuras σ_3 es la presión de confinamiento a la que estuvo sometida la probeta de hormigón. El Anexo C presenta las curvas tensión-deformación axial de las probetas ensayadas a compresión triaxial. Como se aprecia de las figuras, la forma de la curva tensión-deformación axial es similar entre los hormigones estudiados; las curvas presentan un tramo inicial lineal, correspondiente al ascenso de la presión de confinamiento aplicada a la probeta, seguida por un segundo tramo lineal ascendente hasta alcanzar el valor máximo, y un tramo final descendente, cuya pendiente es función de la presión de confinamiento. En todos los casos, las pendientes de los segundos tramos (rama ascendente) de las curvas son muy similares. Sin embargo, las pendientes del brazo descendente van disminuyendo a medida que se incrementa la presión de confinamiento. Por otro lado, es importante destacar que a mayor resistencia del hormigón la

pendiente del post-pico (brazo descendente) de la curva del hormigón confinado es mayor, cuando se comparan niveles de confinamiento similares. Como se mencionó anteriormente, en el régimen post-pico de la curva, la proporción de disminución de la tensión es menor a medida que se incrementa el confinamiento, siendo más evidente para los hormigones de alta resistencia (H70 y HE70).

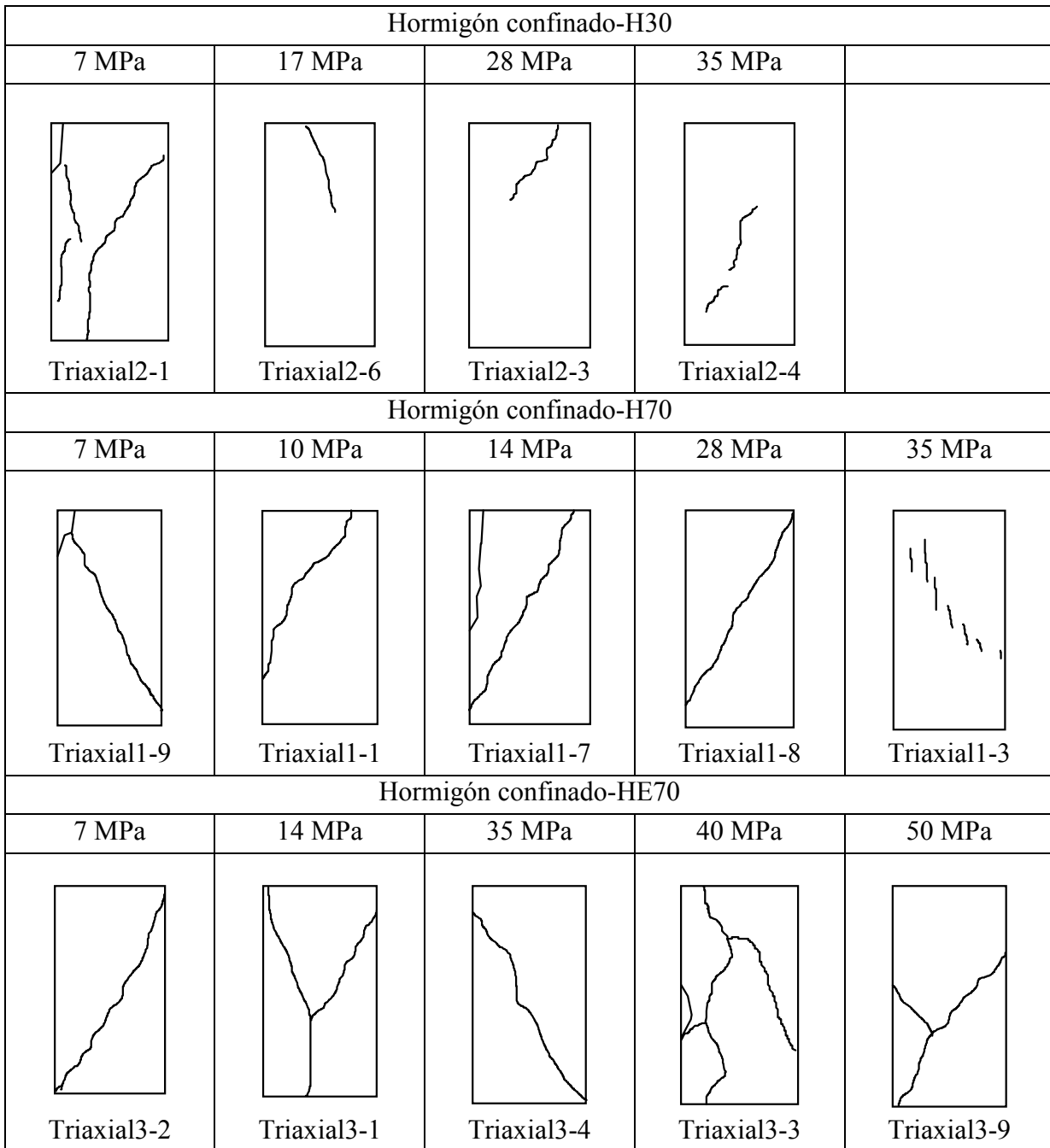


Figura 3.6.a Esquemas del modo de rotura de los hormigones confinados

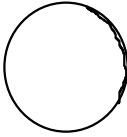
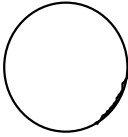
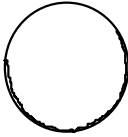

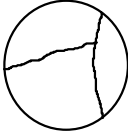
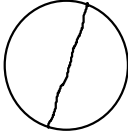
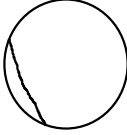

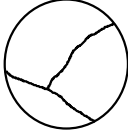
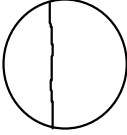

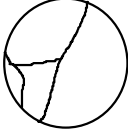
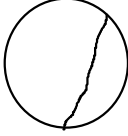
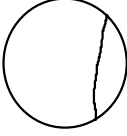
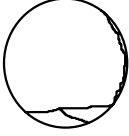
Hormigón sin confinar				
H30	H70	HE70		
				
H30-1 (sup)	H70-2 (sup)	HE70-1 (sup)		
Hormigón confinado-H30				
7 MPa	7 MPa	7 MPa		
				
Triaxial 2-1	Triaxial2-5	Triaxial2-5 (sup)		
Hormigón confinado-H70				
7 MPa	14 MPa	40 MPa	50 MPa	
				
Triaxial1-9 (sup)	Triaxial1-7	Triaxial1-4	Triaxial1-10	
Hormigón confinado-HE70				
7 MPa	14 MPa	35 MPa	50 MPa	50 MPa
				
Triaxial3-5	Triaxial3-1	Triaxial3-7	Triaxial3-8	Triaxial3-9

Figura 3.6.b Esquemas del modo de rotura de los hormigones estudiados

De la Figura 3.7, se puede establecer que el hormigón de baja resistencia (H30) experimenta un incremento significativo en la pseudoplasticidad cuando aumenta la presión de confinamiento, especialmente a presiones mayores que 17 MPa. Sin embargo, en el caso del hormigón de alta resistencia (H70) se necesita un confinamiento mínimo de alrededor de 30 MPa para alcanzar el mismo estado, como se observa en la Figura 3.8. Por lo que se puede decir que la influencia del confinamiento es diferente para ambos hormigones, siendo mayor para el hormigón de baja resistencia (H30). En el caso del hormigón de alta resistencia que incluye un aditivo reductor de retracción (HE70), se alcanzó una mayor pseudoplasticidad hasta presiones del orden de 35 MPa.

Aún cuando el hormigón de alta resistencia sin confinar HE70 experimentó una reducción de resistencia del orden de 13%, con respecto al hormigón de alta resistencia sin confinar H70, como se muestra en la Tabla 3.3, los correspondientes hormigones confinados alcanzaron valores de tensión máxima comparables, para los mismos niveles de confinamiento, como se aprecia en la Figura 3.10.

En general, el comportamiento tensión-deformación axial de los hormigones confinados estudiados fue similar, con grandes incrementos de tensión, comportamiento dúctil y alcanzando niveles de resistencia residual que son función del confinamiento.

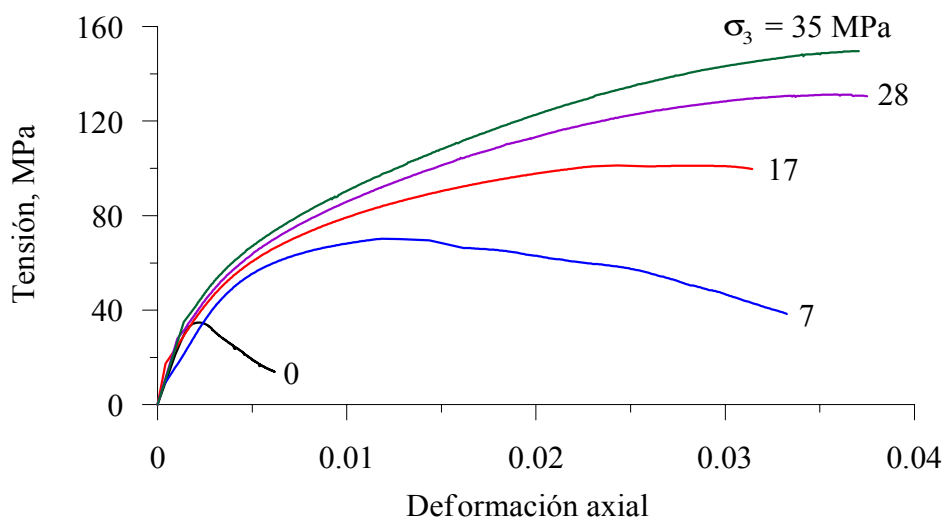


Figura 3.7 Curvas tensión-deformación del H30 bajo diferentes presiones de confinamiento

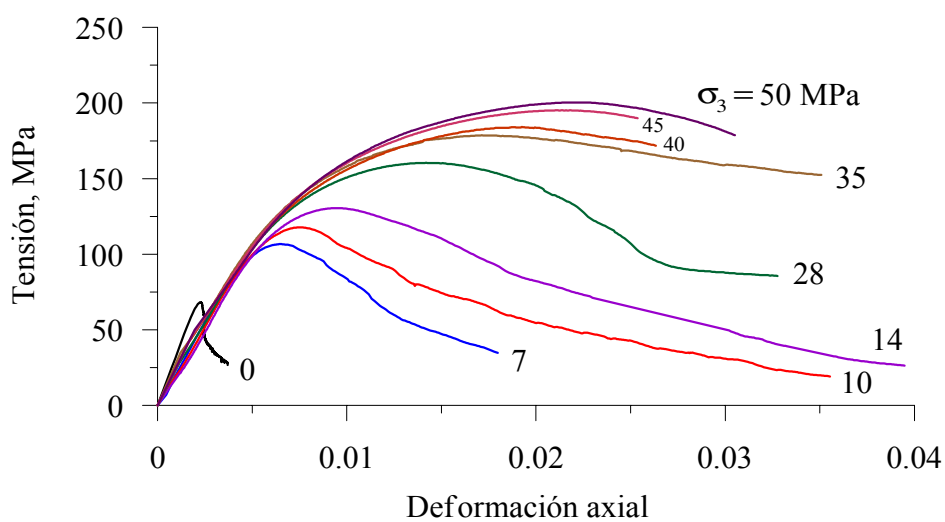


Figura 3.8 Curvas tensión-deformación del H70 bajo diferentes presiones de confinamiento

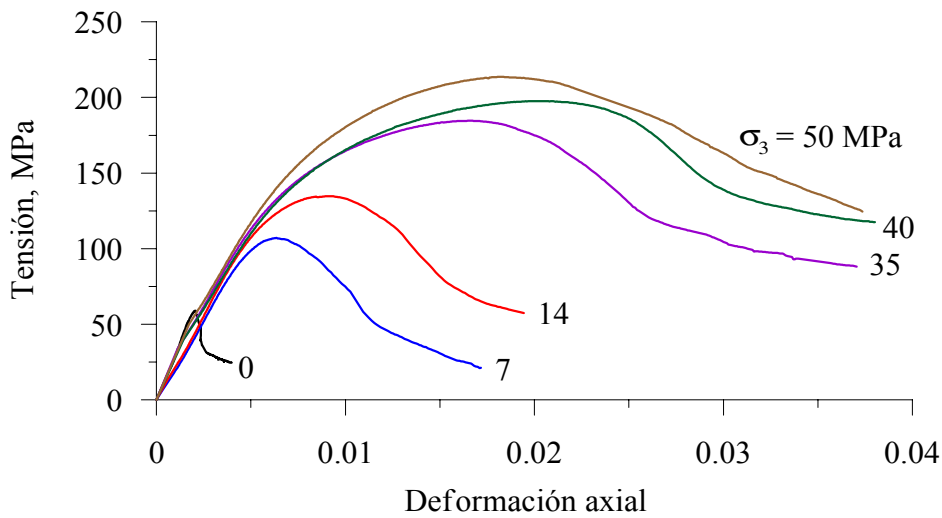


Figura 3.9 Curvas tensión-deformación del HE70 bajo diferentes presiones de confinamiento

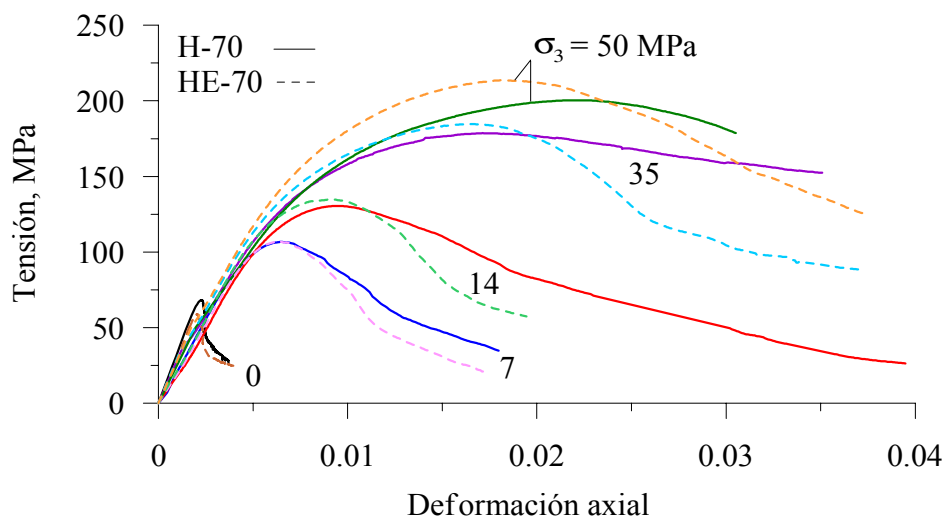


Figura 3.10 Curvas tensión deformación de los hormigones H70 y HE70 confinadas por presión hidrostática

3.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La Tabla 3.4 presenta los resultados de los ensayos, donde f'_c es la resistencia del hormigón a compresión uniaxial, ϵ_c es la deformación axial correspondiente a la tensión máxima en el ensayo uniaxial, σ_3 es la presión de confinamiento, $f'_{c\max}$ es la tensión máxima del hormigón confinado, ϵ_{\max} su correspondiente deformación, y E_i el módulo inicial en el tramo de la aplicación de la carga axial. Los resultados presentados corresponden al promedio de dos ensayos. El Anexo C presenta los resultados de las probetas ensayadas.

Tabla 3.4 Resultados de los ensayos de compresión triaxial

Serie	σ_3 MPa	σ_3 / f'_c	$f'_{c\max}$ MPa	$f'_{c\max} / f'_c$	ϵ_{\max} $\mu\epsilon$	$\epsilon_{\max} / \epsilon_c$	E_i GPa
H30	0	0	$f'_c = 35$	1.00	$\epsilon_c = 2190$	1.0	$E_c = 22.8$
	7	0.20	71	2.03	13440	6.1	14.0
	17	0.49	103	2.94	28040	12.8	12.1
	28	0.80	132	3.77	35620	16.3	10.8
	35	1.00	151	4.31	39620	18.1	11.5
H70	0	0	$f'_c = 68$	1.00	$\epsilon_c = 2250$	1.0	$E_c = 33.7$
	7	0.10	107	1.57	6410	2.8	23.0
	10*	0.15	118	1.73	7490	3.3	22.2
	14*	0.20	130	1.91	9430	4.2	20.9
	28*	0.41	160	2.35	13940	6.2	21.0
	35*	0.51	178	2.62	17130	7.6	20.0
	40*	0.59	184	2.70	19250	8.5	19.2
	45*	0.66	195	2.87	21030	9.3	18.9
	50	0.73	200	2.94	22310	9.9	17.4
HE70	0	0	$f'_c = 59$	1.00	$\epsilon_c = 2030$	1.0	$E_c = 29.9$
	7	0.12	107	1.81	6510	3.2	22.5
	14	0.24	135	2.29	8740	4.3	23.8
	35	0.59	184	3.12	16500	8.1	21.8
	40	0.68	197	3.34	20290	10.0	20.4
	50	0.85	213	3.61	18370	9.0	21.0

* Un solo valor

3.5.1 Tensión máxima y deformación

Los resultados de la Tabla 3.4, muestran un significativo incremento de la tensión máxima y capacidad de deformación debido al efecto del confinamiento. Similarmente, si consideramos el valor σ_3 / f'_c como un índice del nivel de confinamiento, se puede decir que la tensión máxima y su correspondiente deformación se incrementan cuando se incrementa dicha relación. Sin embargo, también se observa que dicha ganancia en tensión y deformación es menor en el hormigón de alta resistencia. En el caso del módulo inicial, para el mismo tipo de hormigón, se observa una tendencia a bajar ligeramente con el aumento del nivel de confinamiento. Similares tendencias fueron obtenidas por investigaciones previas (Dahl, 1992; Sfer et al., 2002).

En el caso del hormigón de baja resistencia H30, se observa un incremento del 100% en la tensión máxima, respecto del hormigón sin confinar, para un nivel de confinamiento de 0.20. De la misma manera se alcanza un incremento de 200% en la tensión cuando el nivel de

confinamiento es del orden de 0.50, y valores de tensión máxima tan altos como 151 MPa, equivalente a un incremento de 330% en la tensión máxima para un nivel de confinamiento de 1. Asimismo, se han alcanzado valores de deformación correspondientes a las tensiones máximas, equivalentes a 6, 13 y 18 veces el valor de la deformación máxima del hormigón sin confinar, para niveles de confinamiento de 0.20, 0.50 y 1, respectivamente.

Similar tendencia se observa en el hormigón de alta resistencia H70, con grandes incrementos en la tensión máxima y su deformación correspondiente, para los diferentes niveles de confinamiento. Por ejemplo, para un nivel de confinamiento de 0.20, la tensión máxima del hormigón confinado se incrementó en 90%. Similarmente, se incrementa 160% para un nivel de confinamiento del orden de 0.50. En este caso, se alcanzaron valores de tensión tan altos como 200 MPa, equivalente a incrementos del orden de 190% con respecto del hormigón sin confinar, para un nivel de confinamiento del orden de 0.70. En el caso de las deformaciones correspondientes a las tensiones máximas, se han incrementado en 4, 8 y 10 veces el valor de la deformación máxima del hormigón sin confinar, para niveles de confinamiento de 0.20, 0.50 y 0.70, respectivamente. Sin embargo, los valores encontrados muestran que el efecto del confinamiento es mayor sobre el hormigón de baja resistencia. Así por ejemplo, para un nivel de confinamiento del orden de 0.50, la tensión máxima del hormigón de baja resistencia H30 se incrementa en 200%, mientras que en el caso del hormigón de alta resistencia H70 se incrementa en 160%. De la misma manera, la deformación correspondiente a la tensión máxima, en el caso del hormigón de baja resistencia H30, se incrementa 13 veces el valor de la deformación correspondiente del hormigón sin confinar, mientras que en el caso del hormigón de alta resistencia H70 se incrementa 8 veces.

En el caso del hormigón de alta resistencia HE70, también se alcanzaron grandes incrementos en la tensión máxima y su correspondiente deformación. Por ejemplo, para un nivel de confinamiento del orden de 0.20, la tensión máxima del hormigón confinado se incrementó aproximadamente 130% respecto del hormigón sin confinar. Similarmente, se incrementa 210% para un nivel de confinamiento del orden de 0.60. En este caso se han alcanzado valores de tensión máxima tan altos como 213 MPa, equivalente a un incremento del 260% en tensión comparado al hormigón sin confinar, para un nivel de confinamiento del orden de 0.85. Asimismo, las deformaciones correspondientes a las tensiones máximas se han incrementado en 4, 8 y 9 veces la correspondiente deformación del hormigón sin confinar, para niveles de confinamiento del orden de 0.20, 0.60 y 0.85. Por otro lado, si comparamos los resultados de las tensiones máximas de los hormigones de alta resistencia H70 y HE70, se puede decir que son bastante comparables, para niveles de confinamiento similares. Por ejemplo, para un nivel de confinamiento del orden de 0.60, las tensiones máximas de ambos hormigones fueron del orden de 180 MPa. Sin embargo, si comparamos los incrementos de tensión con respecto al hormigón sin confinar son mayores en el caso del hormigón HE70. Siendo, del orden de 210% para el hormigón HE70, mientras que para el hormigón H70 fue de 170%, para el nivel de confinamiento del orden de 0.60. Sin embargo, los valores de deformación correspondientes a la tensión máxima, son bastante comparables para similares

niveles de confinamiento. Así por ejemplo, el incremento en deformación máxima para ambos hormigones es del orden de 8 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar, para un nivel de confinamiento del orden de 0.60.

3.5.2 Análisis del efecto del confinamiento sobre la tensión máxima

Para analizar la relación entre la tensión máxima y el confinamiento hidrostático, se emplea el criterio de rotura Mohr-Coulomb. Según este criterio la rotura ocurre cuando la tensión de corte, τ , sobre un plano en un punto del hormigón alcanza un valor que depende linealmente de la tensión normal, σ , en el mismo plano. Matemáticamente, se expresa como:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (3.1)$$

donde c y ϕ son parámetros del material que representan la cohesión y el ángulo de fricción interna, respectivamente. Si consideramos un sistema de coordenadas $x - y$ que coincida con la dirección de los esfuerzos principales $\sigma_1 - \sigma_3$, es posible determinar las componentes τ y σ que actúan sobre el plano que forma un ángulo θ con la dirección de la tensión principal σ_1 :

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \operatorname{sen} 2\theta \quad (3.3)$$

donde,

$$2\theta = \phi + 90 \quad (3.4)$$

En el plano $\sigma_1 - \sigma_3$, las tensiones principales máximas pueden relacionarse con la presión de confinamiento σ_3 , mediante la ecuación:

$$\sigma_1 = f_c + \operatorname{tg} \alpha \cdot \sigma_3 \quad (3.5)$$

donde $\operatorname{tg} \alpha$ es la pendiente de la curva $\sigma_1 - \sigma_3$. De las expresiones (3.2) a (3.5) se puede establecer que:

$$c = f_c \left(\frac{1 - \operatorname{sen} \phi}{2 \cos \phi} \right) \quad (3.6)$$

$$\phi = \operatorname{arcsen} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha - 1}{\operatorname{tg} \alpha + 1} \right) \quad (3.7)$$

La Tabla 3.5 presenta los parámetros Mohr-Coulomb de los hormigones estudiados y las Figuras 3.11 a 3.13 las envolventes de rotura para los correspondientes círculos de Mohr.

Tabla 3.5 Parámetros del criterio de Mohr-Coulomb

Serie	Cohesión	Angulo de fricción	Coeficiente de fricción
	c (MPa)	ϕ	
H30	11.6	31.5°	0.614
HE70	22.6	29.1°	0.557
H70	25.4	26.4°	0.496

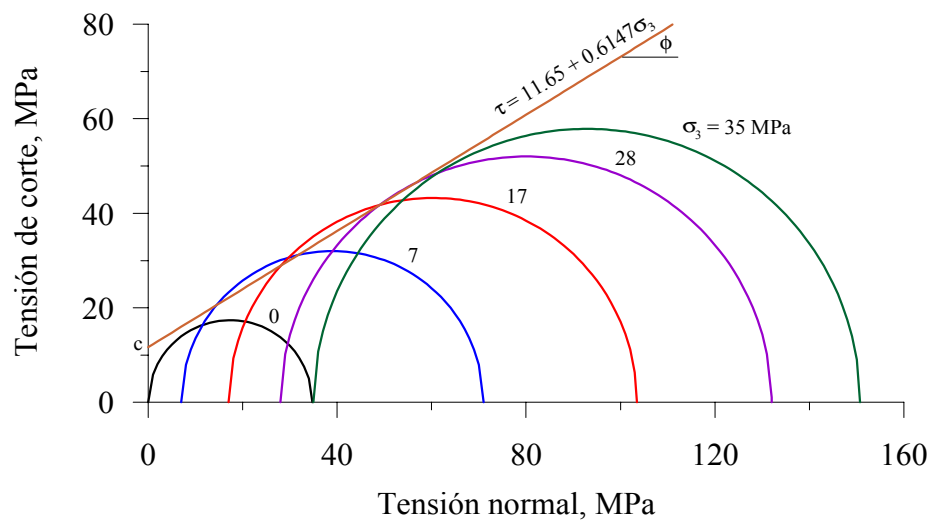


Figura 3.11 Círculos de Mohr de los ensayos triaxiales del hormigón H30

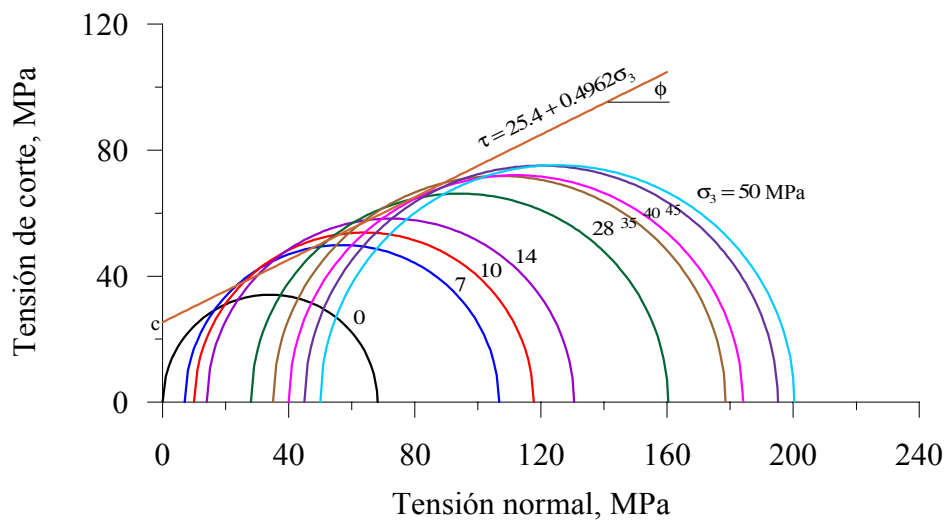


Figura 3.12 Círculos de Mohr de los ensayos triaxiales del hormigón H70

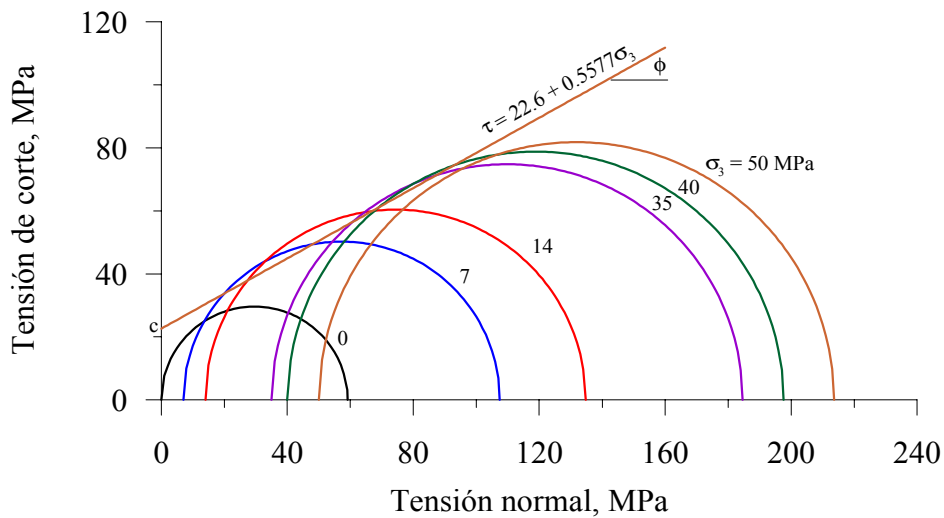


Figura 3.13 Círculos de Mohr de los ensayos triaxiales del hormigón HE70

Los resultados permiten establecer que existe un comportamiento diferente entre los hormigones estudiados. Existe una disminución del ángulo de fricción interna, que varía de 31.5° a 26.4° para el hormigón de baja y alta resistencia, respectivamente. Esta disminución del ángulo de fricción interna, se debe principalmente a que el hormigón de baja resistencia se agrieta a lo largo de la interface pasta-agregado, mientras que el hormigón de alta resistencia se agrieta a través del agregado. Por otro lado, los valores de cohesión de los hormigones de alta resistencia son mayores que el del hormigón normal, como es de esperar.

Basado en análisis similares o empíricas, se han propuesto expresiones que relacionan la máxima tensión y la presión de confinamiento para su uso en el cálculo estructural. En las Figuras 3.14 y 3.15 se presentan los resultados experimentales obtenidos en este estudio junto con los de otras investigaciones (Ansari y Li, 1998; Li y Ansari, 1999; Li y Ansari, 2000; Attard y Setunge, 1996; Lahlou et al., 1992). Los ensayos de Lahlou et al. (1992) fueron llevados a cabo en probetas de 100 × 200 mm, de 50, 80 y 115 MPa de resistencia, confinadas a 7.6 y 22 MPa de presión de confinamiento; y los ensayos de Ansari y Li (1998) se desarrollaron en probetas de 100 × 200 mm, de 42, 69 y 103 MPa de resistencia, sometidas a presiones de confinamiento entre 8.3 y 82 MPa. Los ensayos de Li y Ansari (2000) fueron desarrollados en probetas de 75 × 150 mm, de 69 y 103 MPa de resistencia, sometidas a niveles de confinamiento entre 0 y 1. Se observan las mismas tendencias en las diferentes series de datos.

En las mismas figuras, se comparan los datos experimentales con las predicciones de las expresiones propuestas por varios investigadores (Richart et al., 1928; Hobbs y Pomeroy 1974; Setunge et al., 1993; Ansari y Li, 1998; Xie et al., 1995, ver las expresiones en el Anexo D). De la Figura 3.14 que corresponde al hormigón de baja resistencia se puede decir que, los resultados obtenidos muestran gran concordancia con la expresión propuesta por

Hobbs y Pomeroy (1974), que es una modificación a la propuesta por Richart et al. (1928), que fue obtenida para hormigones de baja resistencia en el rango de 5 a 25 MPa. Del mismo modo en la Figura 3.15, correspondiente al hormigón de alta resistencia, los resultados obtenidos se aproximan bastante a las predicciones propuestas por Setunge et al., (1993) y Ansari y Li (1998). Asimismo los resultados experimentales obtenidos en este estudio para el hormigón H70 son bastante similares a los resultados obtenidos por Ansari y Li (1998) y Li y Ansari (1999-2000).

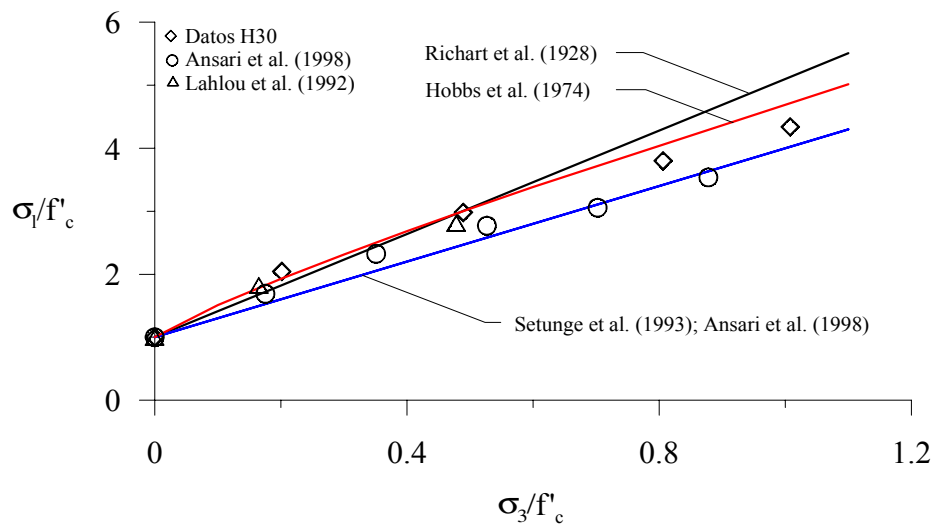


Figura 3.14 Relación entre la tensión máxima y la tensión de confinamiento para el hormigón H30

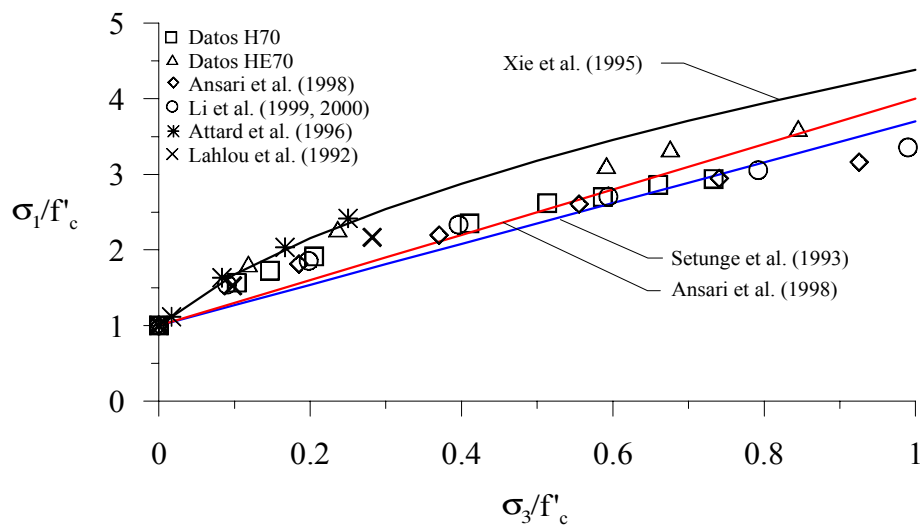


Figura 3.15 Relación entre la tensión máxima y la tensión de confinamiento para los hormigones H70 y HE70

3.5.3 Ductilidad

Como se mencionó anteriormente, un efecto importante del confinamiento sobre las propiedades mecánicas del hormigón es el incremento de su deformación máxima. Las Figuras 3.16 y 3.17 muestran el incremento de la deformación ε como una función del confinamiento σ_3 y presentan una comparación entre los resultados experimentales obtenidos en esta investigación, con los datos encontrados en la literatura existente. Esta comparación indica que las tendencias mostradas por los resultados obtenidos aquí son parecidas a las de los otros estudios.

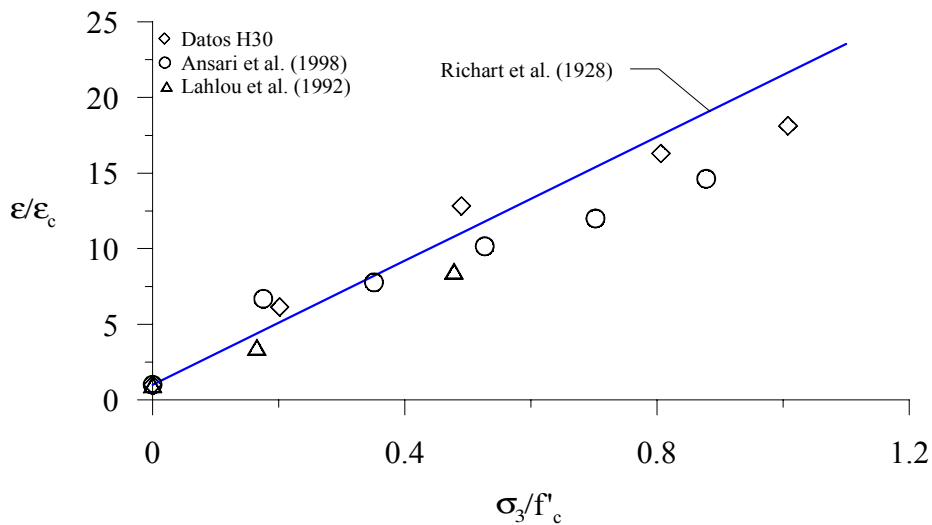


Figura 3.16 Relación entre la deformación máxima y la presión de confinamiento para el hormigón H30

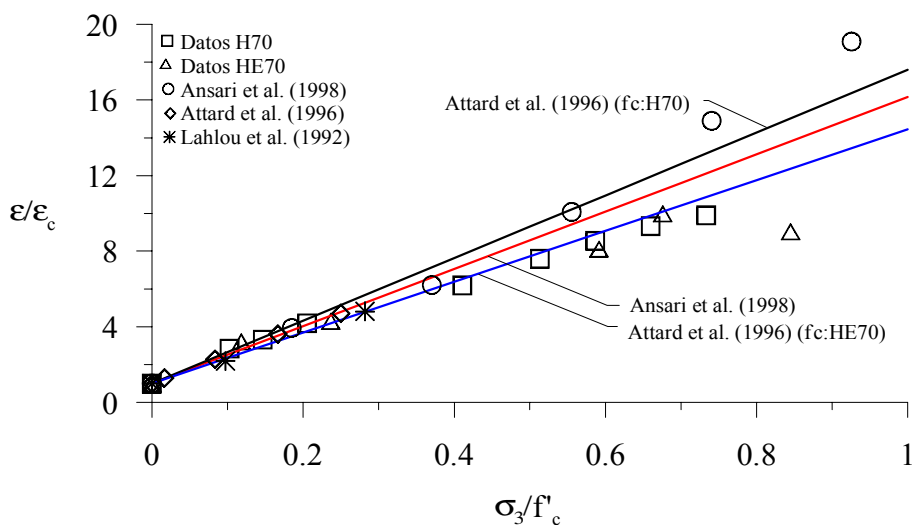


Figura 3.17 Relación entre la deformación máxima y la presión de confinamiento para los hormigones H70 y HE70

Además, en estas mismas figuras se dibujan las predicciones de distintos modelos (Ver las expresiones en el Anexo D). La comparación gráfica permite establecer que para el hormigón de baja resistencia H30 existe una ligera concordancia con la expresión propuesta por Richart et al. (1928) mientras que en el caso de los hormigones de alta resistencia H70 y HE70 existe gran concordancia con los modelos de Ansari y Li (1998), Attard y Setunge (1996) y Lahlou et al. (1992), hasta niveles de confinamiento de alrededor de 0.6.

Como se mencionó anteriormente, la deformación correspondiente a la tensión máxima se incrementa en función del nivel de confinamiento, como se aprecia en la Tabla 3.4, lo que indica un incremento de la ductilidad. Además, la ductilidad puede cuantificarse por el área bajo la curva la tensión-deformación axial. Esta área proporciona información acerca de la energía necesaria para la deformación de la estructura o elemento bajo carga. Por ejemplo, de acuerdo a la instrucción japonesa SF-5 (JSCE 1984) la energía absorbida en compresión por un hormigón reforzado con fibra de acero es evaluada por el área bajo la curva carga-deformación en el punto en el cual la deformación alcanza un valor de 0.75 mm para probetas cilíndricas de 100 × 200 mm. A partir de esta medida de tenacidad en compresión, se evalúa un índice de tenacidad a compresión definida como la tensión media normalizada por la resistencia hasta un límite de deformación axial:

$$\overline{\sigma}_c = \frac{4.T_c}{\pi.d^2.\delta_{ic}.f'_c} \quad (3.8)$$

donde $\overline{\sigma}_c$ es el índice de tenacidad a compresión, T_c es el área bajo la curva carga-deformación hasta la deformación δ_{ic} y d es el diámetro de la probeta en mm. La Tabla 3.6 presenta este índice de tenacidad para valores correspondientes a la deformación δ_{ic} de 0.75% de la deformación, y para 2 y 4 veces este valor. De esta tabla se observa que a medida que se aumenta la presión de confinamiento este índice de tenacidad se incrementa. Así por ejemplo, para el hormigón H30 el índice de tenacidad para una deformación límite de 0.75% es 1.2 y 1.5 para niveles de confinamiento de 0.2 y 1.0, respectivamente. Del mismo modo para una deformación límite de 3.00% es 1.6 y 2.9, para los mismos niveles de confinamiento. En el caso de los hormigones de alta resistencia el incremento en el índice de tenacidad no es tan significativo como en el caso del hormigón de baja resistencia. Así por ejemplo, para niveles de confinamiento del orden de 0.50 el índice de tenacidad para una deformación límite de 0.75% es 1.4 en el caso del hormigón de baja resistencia H30, mientras que para el hormigón de alta resistencia H70 es 1.2. De la misma manera el índice de tenacidad para una deformación límite de 3.00% es 2.3 y 2.1, para el hormigón H30 y H70, respectivamente. Igualmente, para el hormigón HE70 el índice de tenacidad para una deformación límite de 0.75% es 1.4, mientras que para el hormigón H70 es 1.1, para niveles de confinamiento del orden de 0.70, mientras que para una deformación límite del 3.00% el índice de tenacidad es

2.6 para el HE70 mientras que para el H70 es 2.3, para los mismos niveles de confinamiento. Estos resultados permiten establecer que el nivel de incremento de la ductilidad es mayor en el hormigón de baja resistencia con respecto al de alta resistencia.

Tabla 3.6 Índice de tenacidad de los hormigones estudiados

Serie	σ_3 MPa	σ_3 / f'_c	Índice de tenacidad $\overline{\sigma_c}$		
			$\delta_{tc} = 0.75\%$	$\delta_{tc} = 1.50\%$	$\delta_{tc} = 3.00\%$
H30	7	0.20	1.20	1.58	1.64
	17	0.49	1.37	1.87	2.34
	28	0.80	1.44	2.01	2.68
	35	1.00	1.51	2.12	2.89
H70	7	0.10	1.03	1.05	-
	10	0.15	1.05	1.23	0.98
	14	0.20	1.03	1.42	1.06
	28	0.41	1.12	1.68	1.76
	35	0.51	1.17	1.78	2.15
	40	0.59	1.15	1.76	-
	45	0.66	1.15	1.80	-
50	0.73	1.14	1.81	2.34	
HE70	7	0.12	1.17	1.10	-
	14	0.24	1.30	1.66	-
	35	0.59	1.42	2.14	2.35
	40	0.68	1.39	2.15	2.63
	50	0.85	1.49	2.33	2.84

3.6 CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento mecánico del hormigón confinado con presión hidrostática. Los estudios se realizaron en hormigón de baja y alta resistencia, determinándose sus propiedades mecánicas y su comportamiento tensión-deformación. Además, se calculó el área bajo la curva tensión-deformación axial que permitió establecer la energía acumulada en la probeta bajo la carga aplicada, y por lo tanto, determinar la influencia del confinamiento sobre la ductilidad.

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

Se ha comprobado que el hormigón de baja resistencia es más dúctil bajo confinamiento, en comparación con el hormigón de alta resistencia. Y en general, el confinamiento aumenta la resistencia a la compresión del hormigón, así como su capacidad de deformación, mejorando

su ductilidad. El efecto de la presión de confinamiento, en términos de incremento de resistencia y deformación, es mayor en el hormigón de baja resistencia.

En el hormigón de baja resistencia H30, la resistencia del hormigón confinado se incrementó 4 veces la resistencia del hormigón sin confinar para una presión de confinamiento de 35 MPa, equivalente a un nivel de confinamiento de 1.0. En el hormigón de alta resistencia H70, el incremento fue de 3 veces la resistencia del hormigón sin confinar para 50 MPa de presión de confinamiento, equivalente a un nivel de confinamiento de 0.70, mientras que en el caso del hormigón de alta resistencia HE70 fue de 3.6 veces la resistencia del hormigón sin confinar para una presión de confinamiento de 50 MPa, equivalente a un nivel de confinamiento de 0.85.

Se pueden alcanzar muy altas resistencias, cuando un hormigón es confinado, y mantener aún un nivel importante de deformación bajo carga. En el caso del hormigón de baja resistencia se alcanzó una resistencia máxima del orden de 150 MPa; y para los hormigones de alta resistencia, del orden de 200 MPa.

La deformación máxima, correspondiente a la tensión máxima, registrada en los ensayos confinados, fue muy superior a aquella del hormigón sin confinar. En el caso del hormigón de baja resistencia H30, la deformación máxima registrada fue 18 veces la del hormigón sin confinar, para un nivel de confinamiento de 1.0. En los casos de los hormigones de alta resistencia H70 y HE70, fueron de casi 10 y 9 veces la deformación máxima del hormigón sin confinar, para niveles de confinamiento de 0.70 y 0.85, respectivamente.

La ductilidad de los hormigones confinados calculada mediante valores que relacionan áreas bajo la curva tensión-deformación axial se incrementa con el incremento de la presión hidrostática de confinamiento.