

Capítulo 4

Resultados de los Ensayos de Compresión Triaxial

En éste capítulo se presentan los resultados del trabajo experimental efectuado con el equipo triaxial de escolleras, mostrado en el capítulo anterior. Se comienza con las características del material utilizado, y los detalles del montaje de la probeta en el equipo triaxial. Los ensayos realizados tienen distintas trayectorias en las que se varió: la humedad relativa (36, 52, 76, 92 y 100%) y la presión de confinamiento ($\sigma_3 = 0.1, 0.3, 0.5$ y 0.8 MPa) y fueron realizados con deformación controlada y tensión controlada. De los realizados con deformación controlada se pudo obtener la influencia en la humedad relativa en la resistencia al corte, y se discute además, la condición de estado crítico. De los ensayos realizados con tensión controlada se obtuvo la forma de la superficie de fluencia con distintas humedades relativas (36 y 100%); y la influencia de esta, en el tamaño de aquella. Los ensayos isótropos formaron también parte del programa experimental y se presentan los resultados obtenidos. Se discute la validez de las mediciones de deformación axial local y global obtenidas, y por último, se estima la penetración de membrana que se presenta en los ensayos triaxiales. El propósito principal de este programa experimental, es conocer la influencia de la succión sobre la resistencia corte y la deformación de las escolleras en ensayos de compresión triaxial.

4.1 Descripción del material utilizado

El material es una Pizarra de origen cámbrico que proviene del afloramiento del río Pancrudo en la afluencia al Jiloca, localizado en la provincia de Teruel. En este lugar, está proyectada una presa de tierras de 30 metros de altura para la regulación del río Pancrudo.

El material ensayado se pretende utilizar como espaldón de escollera en la presa de tierras con el núcleo de arcilla proyectada. Este material fue utilizado por Oldecop (2000) en sus ensayos edométricos, realizados con el objetivo de estudiar la influencia de la succión en la compresibilidad del material. El presente estudio es la segunda parte de la caracterización del comportamiento mecánico de las escolleras a diferentes succiones, que se realiza en el laboratorio de geotecnia de la UPC. En este apartado se presenta un resumen de las características básicas del material, obtenidas por Oldecop (2000), y la verificación de algunas propiedades en el material de reposición.

Los minerales que contiene el material son: cuarzo, moscovita, cinocloro, calcita, y dolomita. La roca es gris con planos de foliación de color marrón. La resistencia a la compresión simple (testigos con diámetro de 84 mm) se encuentra entre 14.2 y 31.9 MPa (valor medio 20.5 MPa). La resistencia a la tracción es de 1.24 MPa. La densidad de los sólidos es de 2.75. La absorción de agua está entre 1.36 y 1.87% (valor medio 1.62%). La porosidad de los testigos varía de 6.3 a 11.8 % (valor medio 8%). La Figura 4.1 muestra una vista del afloramiento donde se obtuvo el material.



Figura 4.1 Foto del afloramiento de pizarra en las márgenes del río Pancrudo.

Debido a la cantidad de material necesario para los ensayos, se realizó un segundo muestreo en el lugar, 5 años después de realizado el primer acopio. Por lo cual, la última parte del programa experimental se realizó con el nuevo material. A pesar de que el material proviene del mismo lugar, se detectó que el nuevo tenía una deformación volumétrica mayor que el anterior. Esta diferencia en comportamiento se atribuye al hecho de que el material tiene una forma más lajeada. En la Figura 4.2 se encuentra una foto del material repuesto y el anterior. A simple vista se puede ver que el nuevo material es más plano. Para corroborarlo cuantitativamente se determinó el índice de lajas (UNE-EN 933-3:1997), tal como se hizo para el material inicial; se obtuvo un 19 % de lajas para el inicial y un 39 % para el repuesto. Se realizó también una prueba de desgaste de Los Angeles (NLT-149/91), se obtuvo un coeficiente de desgaste de Los Angeles de 25% para el material anterior y un 35% para el nuevo. Estos resultados muestran que el material nuevo se deteriora más ante una acción mecánica. De acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.1 un material que tenga una forma alargada, y en este caso, orientado después de la compactación horizontalmente; dilata poco, pues las partículas tienen un espesor pequeño. Este comportamiento que se verifica en los resultados de los ensayos realizados con el nuevo material. En lo sucesivo se les denominará Material 1 y Material 2, al material anterior y al repuesto correspondientemente.

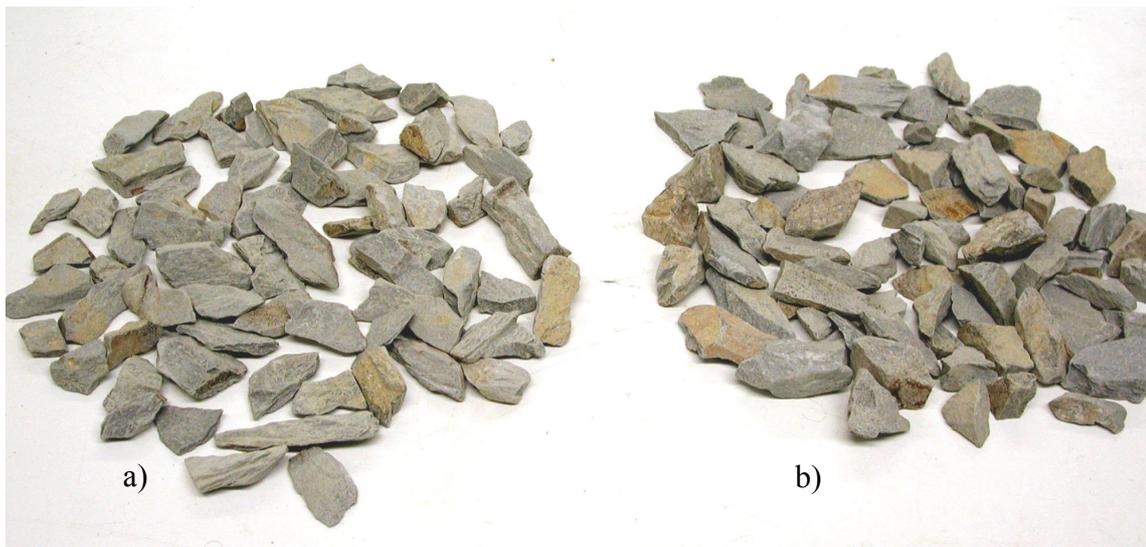


Figura 4.2 Materiales ensayados. a) Material repuesto, b) Material inicial.

La granulometría utilizada en los ensayos es uniforme, tiene un $C_u = 2.9$, el tamaño máximo de la partícula es de 40 mm. La curva granulométrica que se utilizó en los ensayos del material se encuentra en la Figura 4.3.

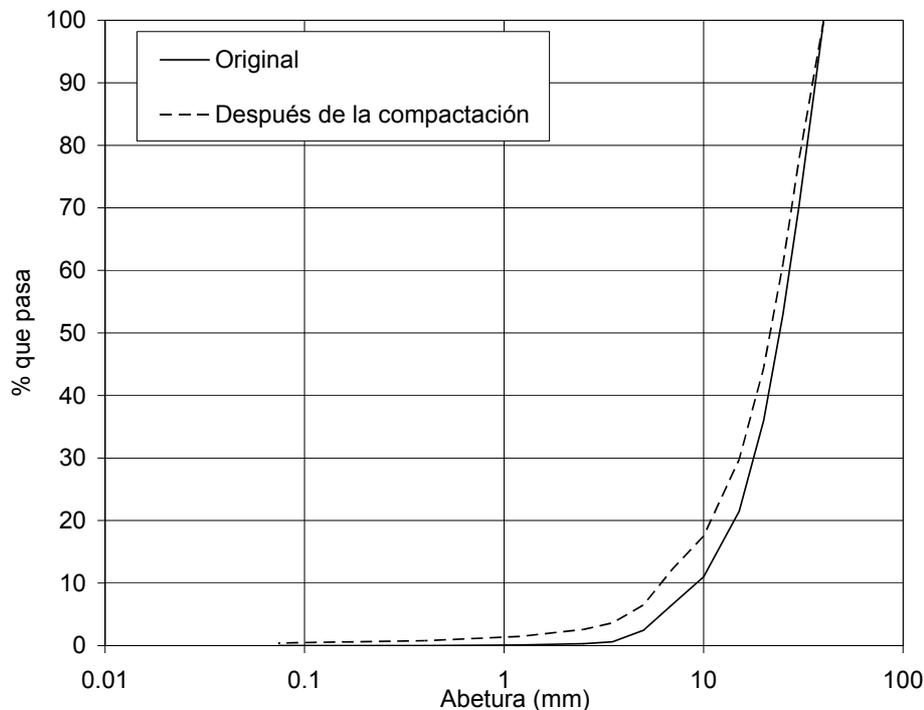


Figura 4.3 Granulometría del material antes y después de la compactación. Oldecop (2000)

La curva de retención del material se obtuvo con diferentes técnicas: equilibrio de vapor (mencionada en el capítulo anterior para succiones altas >1000 kPa), traslación de ejes para succiones intermedias (10-500 kPa) y la técnica del tensiómetro para el rango de succiones más bajo (<10 kPa). La técnica de traslación de ejes consiste en establecer una diferencia entre la presión de aire y del agua sin que el agua cavite. Se logra trasladando ambas presiones hacia un valor positivo, colocando una piedra de alto valor de entrada de aire (AVEA) saturada entre el suelo y el subministro de agua. El tamaño de poros de la piedra está relacionado con la máxima tensión capilar que se desea imponer.

Las técnicas anteriores se aplicaron a trozos de rocas, a las que se les refrentó y pulió una de sus caras. Los resultados obtenidos por Oldecop (2000) en la pizarra del río Pancrudo se muestran en la Figura 4.4. Se asumió la hipótesis de que la succión osmótica es nula, para poder hacer directamente comparables los resultados obtenidos, en la aplicación de las técnicas de traslación de ejes y tensiómetro con la técnica de equilibrio de vapor. Las

líneas continuas presentan una tendencia media de los ensayos realizados. Existen también tramos de curvas para los cuales se hizo una regresión, y, se muestra la ecuación y el ajuste realizado. La curva característica muestra histéresis, se obtiene mayores contenidos de agua cuando el material se está secando, que cuando a este le entra el agua. Como la energía almacenada (succión) es capaz de cambiar el comportamiento de las partículas de roca, es fundamental realizar un análisis del flujo de agua dentro de los poros de la roca. Esta curva posee, información del tamaño de los poros y como el agua es almacenada dentro de ellos, y prevé el modo en que esta se mueve cuando se presenta un cambio de humedad.

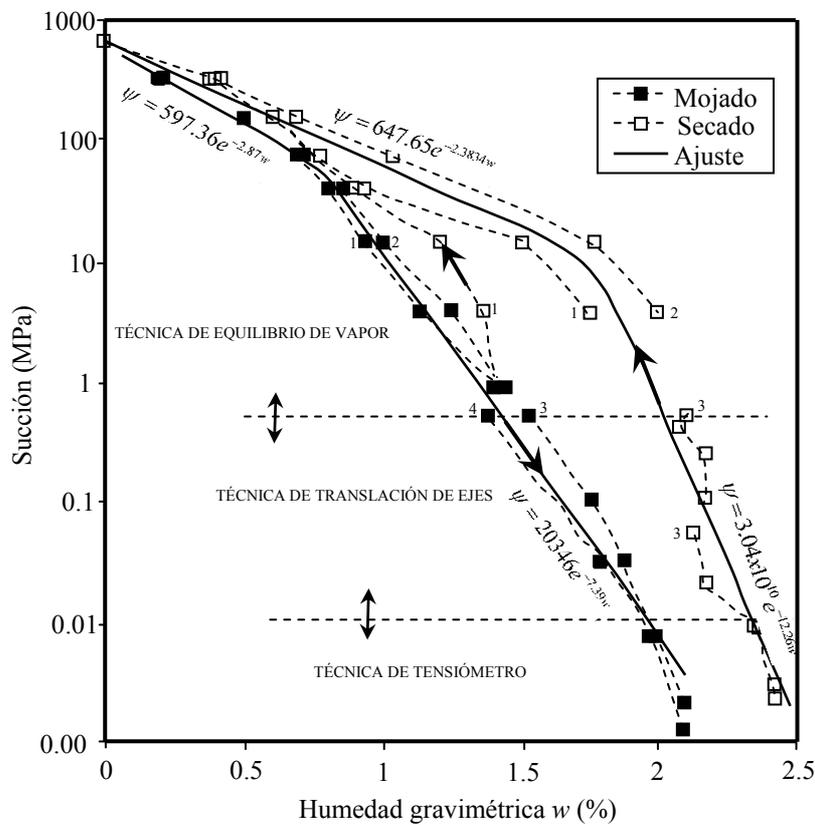


Figura 4.4 Curva de retención de la pizarra del río Pancrudo. Datos experimentales y expresiones matemáticas ajustadas a las ramas de mojado y secado. Los números identifican las muestras ensayadas. Oldecop (2000).

4.2 Montaje de las probetas

Después de traer el material de la cantera, se trituro hasta alcanzar un tamaño máximo de 40 mm. El material fue pasado por los tamices 40, 30, 25, 20, 15.08, 10, 7, 5, 3.5, 2.5, 1.2 y 0.4 mm, para formar la granulometría inicial (Figura 4.3). Se utilizó un total de 42 kg de material compactado para formar la probeta con dimensiones de; 500 mm de altura por 250

mm de diámetro. Una vez formada la granulometría se divide el material en seis porciones aproximadamente iguales. Debido a que el material granular no tiene cohesión se prefirió compactar en el molde con la membrana de neopreno colocada, de esta forma cuando se retira el molde el material queda confinado por esta (Figura 3.6). Antes de colocar la primera capa, se coloca una porción de material (230 gr) de tamaño entre 10 y 15.08 mm, para rellenar los huecos que hay entre el disco poroso y el material (Oldecop 2000), ver Figura 4.5. El material de relleno evita la rotura prematura de las aristas de la roca que están en contacto directo con el disco poroso, ya que aumenta el área de contacto. Después de colocar la capa de relleno, se va compactando cada capa con 117 golpes con un pisón de compactación Marshall utilizado en asfaltos (se observa también en la Figura 3.6). El pisón tiene una placa de 100 mm de diámetro en su parte baja, para evitar que el material se rompa excesivamente cuando se está compactando. Las probetas se compactaron con una energía promedio de $638.6 \pm 25 \text{ kJ/m}^3$. Con esta energía se obtuvo una relación de vacíos promedio de 0.59 ± 0.05 . Se determinó la granulometría después de la compactación (ver la Figura 4.3) con el fin de tener una referencia inicial, y así poder calcular la rotura de partículas producida solamente por el efecto mecánico de los ensayos.

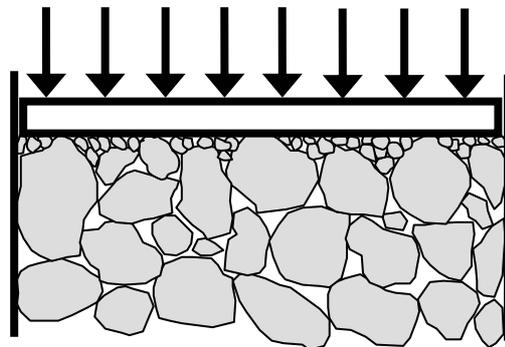


Figura 4.5 Capa de material que evita la rotura prematura del material de la probeta Oldecop (2000)

Una vez compactado el material, la base del triaxial junto con molde de compactación y material, se colocan en el carro del marco de carga. El molde se retira, dejando la muestra sólo sustentada por la membrana de neopreno. En seguida, se procede a terminar el montaje colocando: las CMD, el cabezal, el cilindro interior, los LVDT y tuberías interiores. Se coloca por último, para completar el montaje, el cilindro exterior y la tapa (cuerpo principal). Estos elementos se guían durante su posicionamiento, mediante dos barras de acero que se colocan en los agujeros de los tornillos, para evitar golpear algún elemento sensible.

En el inicio de todos los ensayos se aplicó una pequeña carga vertical (alrededor de 3.9 kN, 400 kgf) con el eje superior de la prensa de carga, para asegurar el contacto entre el cabezal y la muestra. Después se comenzó el ensayo.

4.3 Descripción de las trayectorias tensión-deformación-succión

En este apartado se explica en detalle las trayectorias de ensayos realizados en el programa experimental. En la **Tabla 4.1** se presenta un listado de las condiciones iniciales: energía de compactación aplicada y densidad; y, finales: contenido de humedad y rotura de partículas. La humedad inicial de las muestras osciló entre $0.77 \pm 0.2\%$. Para la estimación de la cantidad de partículas rotas en el ensayo, se utilizaron los parámetros de Marsal, B_g y el de Hardin, B_r (el parámetro de Hardin se definió en el apartado 2.1). La definición del parámetro B_g , se basa en obtener las diferencias en porcentaje entre las granulometrías inicial y final del material retenido en cada tamiz, Δ_i ; la suma total de estas diferencias es igual a cero (ver Figura 4.6). El parámetro B_g se define como la suma de las diferencias Δ_i , que tienen signo positivo (Marsal 1969). Este valor representa aproximadamente el porcentaje en peso de las partículas que han sufrido fragmentación.

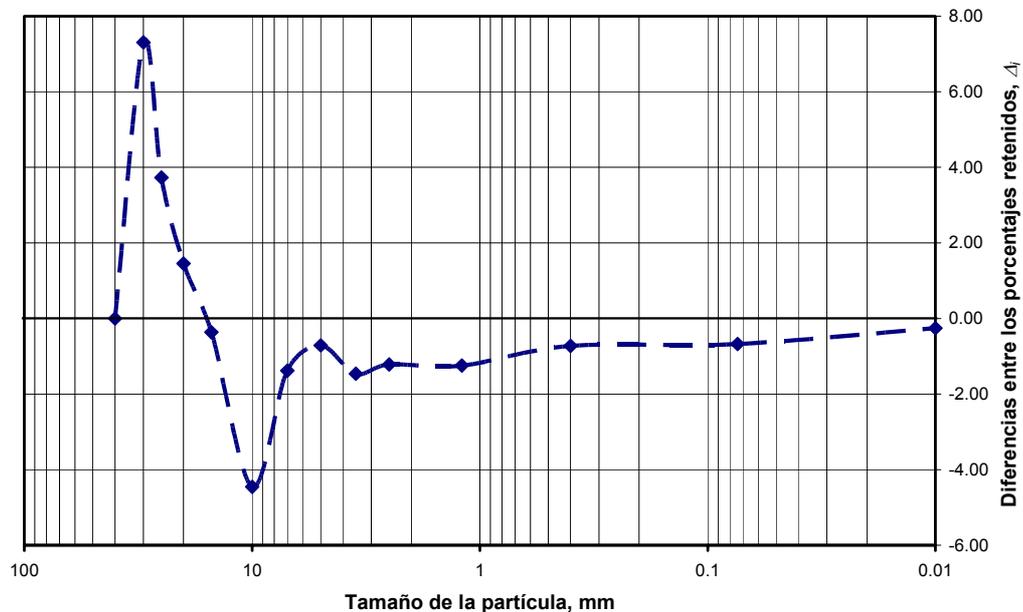


Figura 4.6 Variación de la distribución granulométrica producida por la rotura de partículas del ensayo S1.

En la Tabla, el primer bloque de ensayos está delimitado por una línea doble, fue realizado con deformación controlada, el segundo con tensión controlada, y al final se encuentra el ensayo para determinar la rotura de partículas durante la compactación.

Tabla 4.1 Condiciones de compactación iniciales y parámetros de rotura después del ensayo para cada muestra.

Ensayo *	γ_{ini} (tn/m ³)	e_{ini}	Energía de compactación (kJ/m ³)	w_{final} (%)	B_g (%)	B_r
S1	1.692	0.628	623.06	3.39	17.49	0.090
S3	1.704	0.617	627.29	3.52	22.84	0.133
S5	1.704	0.616	627.51	5.64	29.78	0.162
S8	1.683	0.636	619.76	5.64	33.64	0.200
D1(36)	1.736	0.587	639.10	0.76	12.49	0.043
D3(36)	1.756	0.567	647.00	0.74	19.28	0.070
D5(36)	1.784	0.544	656.67	0.75	20.90	0.077
D8(36)	1.722	0.599	634.15	3.25	21.85	0.080
D1(92)	1.736	0.5861	639.40	1.39	22.87	0.084
D3(92)	1.738	0.5849	639.85	1.25	28.66	0.107
D5(92)	1.733	0.5889	638.31	1.18	32.42	0.121
D5(52)	1.775	0.551	653.53	0.74	32.18	0.124
D5(75)	1.765	0.561	649.86	0.94	31.59	0.121
D5(85)	1.796	0.534	661.32	1.07	32.74	0.126
FSV1	1.703	0.617	627.22	3.52	30.00	0.124
FSV2	1.703	0.617	627.22	3.52	25.75	0.102
FS1	1.703	0.617	627.22	3.52	19.18	0.073
FS2	1.703	0.617	627.22	3.52	18.26	0.070
FS3	1.767	0.559	650.65	2.82	19.53	0.069
FD1	1.720	0.602	633.12	0.76	16.55	0.056
FD2	1.768	0.557	651.24	0.76	12.21	0.041
FD3	1.728	0.594	636.35	0.75	15.25	0.047
FDS1	1.735	0.587	638.85	4.53	29.73	0.117
FDS2	1.706	0.613	628.18	3.58	27.78	0.098
FDS3	1.709	0.611	629.15	0.72	27.38	0.102
DC3	1.799	0.5305	662.46	4.83	31.93	0.120
DC5	1.746	0.578	642.64	4.25	32.55	0.129
IS	1.695	0.616	623.98	3.39	11.48	0.056
IC	1.773	0.553	652.91	4.83	31.93	0.120
C**	1.80	0.532	661.92		8.45	0.034

* S = saturado, D = "dry" F = ensayos para determinar la superficie de fluencia, I = isótropo, C = Ensayo con saturación a tensión desviadora o isótropa constante. El número después de la letra S o D advierte la presión de confinamiento en MPa multiplicada por 10; en los ensayos para obtener la superficie de fluencia significa el número de ensayo. El número entre paréntesis indica la humedad relativa en porcentaje aplicada en el ensayo.

** Ensayo para obtener la granulometría después de la compactación.

4.3.1 Ensayos con deformación controlada

En este tipo de ensayos se maniobró de la siguiente manera: primero se impuso la humedad relativa deseada; posteriormente se aplicó la presión de confinamiento con un incremento promedio de 0.33kPa/s, para evitar que hubiese una caída de la presión repentina en el sistema de aire comprimido. En todos los casos se dejó consolidar por 3 horas después de alcanzar la presión deseada. Por último, se aplicó una deformación constante promedio de 0.052 mm/s. Alrededor de 30 min duró la aplicación del desviador para alcanzar una deformación del 20%.

La primera serie de ensayos fue para caracterizar el material saturado ($\psi = 0$). Se realizaron 4 ensayos con diferentes presiones de confinamiento 0.1, 0.3, 0.5 y 0.8 MPa. A los ensayos se les denomina S1, S3, S5 y S8, respectivamente. En la segunda serie se impuso una humedad relativa de 36 % ($\psi = 139$ MPa), para las cuatro presiones de confinamiento mencionadas; los ensayos fueron nombrados como D1(36), D3(36), D5(36) y D8(36).

Se hicieron además otros ensayos, todos con una presión de confinamiento de 0.5 MPa y humedad relativa variable, para comparar la diferencia en comportamiento producida por la succión. Se realizaron pruebas con humedades relativas de 52, 75, 85, 92 (succiones de 89.1, 39.2, 22.2 y 11.4 MPa). Los ensayos son identificados como D5(52), D5(75), D5(85) y D5(92), respectivamente. Otros ensayos que fueron hechos con humedad relativa intermedia con presiones de confinamiento de 0.1 y 0.3, son los ensayos D1(92) y D3(92).

Todos los ensayos con deformación controlada se llevaron hasta una deformación del 20%, con la finalidad de definir el estado crítico. En ningún ensayo se observó franjas de localización de deformación; ni exteriormente, ni interiormente cuando se retiró el material al término del ensayo con la mano.

4.3.2 Ensayos con tensión controlada

Los ensayos de tensión controlada fueron de dos tipos: trayectorias para encontrar la superficie de fluencia y trayectorias de humedecimiento a tensión constante.

Las trayectorias iniciales que sirvieron para obtener las superficies de fluencia son del tipo escalonado (ver Figura 4.7); se hicieron con el material saturado. El objetivo de estos ensayos fue tener un bosquejo inicial de la forma de la superficie. El procedimiento consiste en lo siguiente: se posiciona la superficie de fluencia en compresión isotrópica (0.8 MPa), después se regresa periódicamente en intervalos de 0.05 MPa, en cada intervalo se aplica tensión desviadora, con la prensa funcionando en deformación controlada. La aplicación del desviador termina una vez que se cruce lo suficiente la superficie de fluencia, para poder definir el punto de fluencia. Posteriormente se disminuye a cero la tensión desviadora, y se retrocede en tensión isotrópica otro intervalo de 0.05 MPa. Se repitió el procedimiento hasta alcanzar una tensión isotrópica de 0.15 MPa. Al unir el punto de posicionamiento de la superficie de fluencia, con el punto sobre la superficie localizada por la trayectoria paralela, se obtuvieron segmentos de curva correspondientes a la superficie de fluencia posicionada. Se realizaron dos ensayos y fueron etiquetados como FSV1 y FSV2.

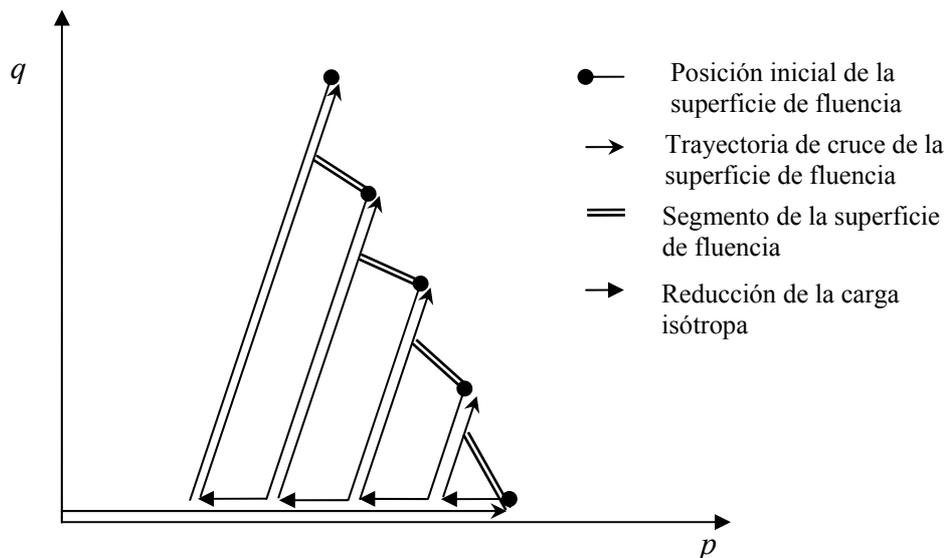


Figura 4.7 Trayectorias escalonadas para obtener segmentos de la superficie de fluencia.

Una vez conocida de forma aproximada la superficie de fluencia se hicieron otro tipo de trayectorias, las mostradas en la Figura 4.8. La trayectoria inicial (O-C-F) tiene la finalidad de posicionar la superficie de fluencia en una tensión $p = 0.5$ MPa y una $q = 0.68$ MPa (punto F), después se regresa por el mismo trayecto hasta el punto C, y a partir de aquí se siguen tres trayectorias diferentes: la primera isotrópica hasta una tensión media de 1 MPa, la segunda es una etapa donde se incrementa el valor de q , y se mantiene el valor de p

constante, la tercera es una trayectoria intermedia entre la de posicionamiento y la isotrópica. Estas trayectorias se realizan en el material saturado y para el material con una HR de 42 % ($\psi = 118$ MPa). A los ensayos saturados se les identifica como FS1, FS2 y FS3, y a los realizados con HR de 42% como FD1, FD2 y FD3.

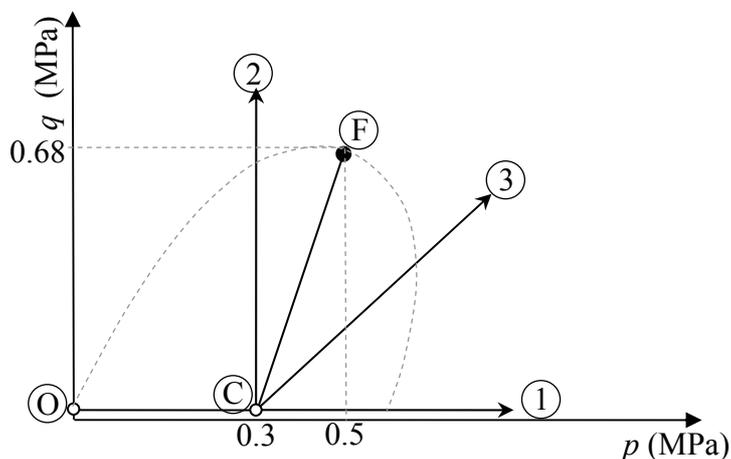


Figura 4.8 Trayectorias básicas para encontrar la superficie de fluencia.

Con el objetivo de detectar si la superficie de fluencia generada en la zona no saturada, se contrae cuando se satura el material, se idearon las trayectorias mostradas en la Figura 4.9. Los tres ensayos se denominaron FDS1, FDS2 y FDS3. Con ellos se obtienen dos puntos de la superficie de fluencia en la parte no saturada, y dos en su homologa contraída en la zona saturada. En los tres ensayos se inició por imponer una HR de 36%; seguida de una trayectoria isotrópica hasta 0.3 MPa, se dejó consolidar por un tiempo de 30 min; y se continuó con la aplicación del desviador con deformación controlada hasta alcanzar 1.27 MPa. En los tres ensayos se posicionó la superficie de fluencia con el anterior procedimiento. Se interceptó la superficie de fluencia en la zona de saturada en dos puntos: la primera intersección fue con el ensayo FDS1, que después de fijada la superficie de fluencia se disminuyó el desviador hasta cero, y posteriormente la presión de confinamiento hasta 50 kPa, en este punto se inundó la muestra con agua, y después se siguió una trayectoria de tensión p - q con una inclinación de 45° , hasta una tensión donde se estuviese seguro de que se definía correctamente la intersección de la superficie de fluencia; la segunda fue con el ensayo FDS2, que tuvo la misma descarga y saturación que el ensayo anterior, sólo que la trayectoria seguida para interceptar la superficie fue isotrópica. El tercer (FDS3) ensayo sirvió para ver donde se localizaba la superficie de fluencia en la zona no saturada. Así que se descargó de igual manera que en los ensayos

anteriores hasta una carga isotrópica de 50 kPa, y se recargó con una trayectoria isotrópica hasta poder definir la intercepción de la superficie de fluencia.

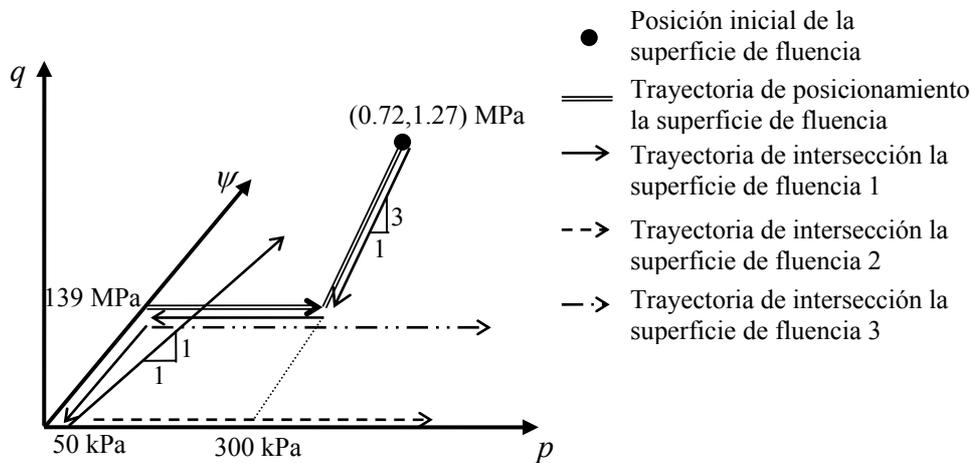


Figura 4.9 Trayectorias de tensión para encontrar la superficie de fluencia en la zona saturada, cuyo posicionamiento inicial fue hecho en la zona no saturada.

En los ensayos DC3 y DC5 se disminuyó la humedad relativa con una tensión vertical constante de 0.8 y 1.2 MPa respectivamente; las presiones de confinamiento aplicadas fueron de 0.3 y 0.5 MPa en el mismo orden. En los ensayos se sigue una trayectoria con la deformación controlada, hasta una tensión desviadora menor a la máxima alcanzada por el ensayo saturado. Después se mantiene la carga vertical constante y se empieza a variar la HR desde un valor inicial de 36% hasta alcanzar el 100%. En el ensayo DC5 se realizó el cambio de HR mediante la saturación. El ensayo se termina aplicando deformación controlada, hasta alcanzar un 20 % de deformación axial (ver Figura 4.10).

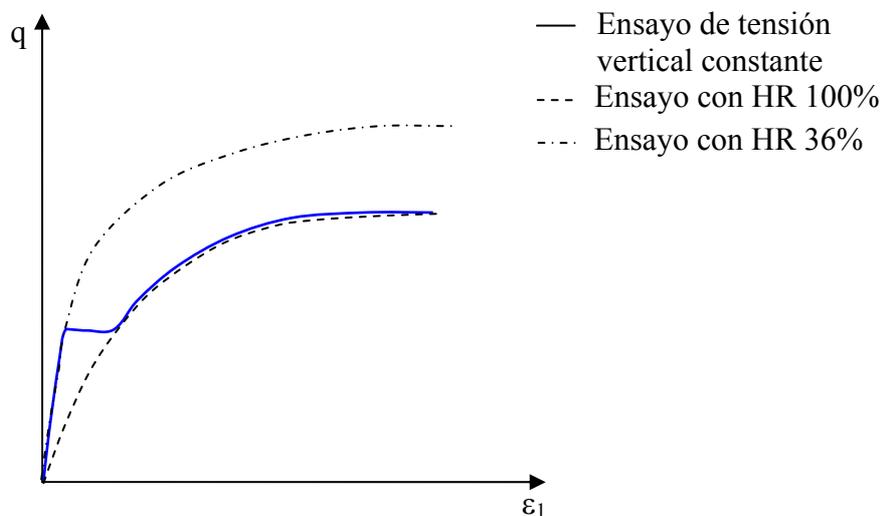


Figura 4.10 Ensayos de cambio de humedad relativa con carga vertical constante.

4.3.3 Ensayos isótropos

Con la finalidad de encontrar los parámetros del modelo de Oldecop y Alonso (2001), se realizaron dos ensayos isótropos; aplicando una presión de confinamiento máxima de 1 MPa. El primero se realizó con la probeta saturada con agua, ensayo IS. La saturación se realizó a una presión de confinamiento de 0.05 MPa. Los incrementos de carga fueron de 0.1 MPa y se dejó consolidar por 1 día. Al llegar a 1 MPa se descargó en intervalos de 0.2 MPa.

El segundo ensayo se inició con una humedad relativa de 36% ($\psi = 139$ MPa). Se realizaron incrementos de carga de 0.1 MPa hasta una presión de confinamiento de 0.6 MPa. Manteniendo la presión de confinamiento constante se saturó con agua el material. Al terminar el humedecimiento se prosiguió a cargar en intervalos de 0.1 MPa hasta llegar a 1 MPa. Por último se descargó en intervalos de 0.2 MPa. El ensayo se identifica como IC. La duración de los intervalos de carga fue de 25 min., debido al interés por el comportamiento instantáneo.

Con la saturación del material en el ensayo IC, no se obtuvo la variación de la deformación de colapso en función de la succión (ver Figura 2.16). Pero se supuso que el estado muy seco se presentaba a una succión de 67 MPa, tal como se obtuvo en los ensayos de Oldecop (2000). No se realizó el cambio paulatino de la HR, debido a que las galgas sumergibles de las CMD se pueden deteriorar cuando se encuentran sujetas a presiones por tiempos prolongados. Como este aspecto ya estaba descrito adecuadamente en los ensayos de Oldecop (2000), y no era prioritario para la presente investigación, se decidió no arriesgar el equipo.

4.4 Ensayos de compresión triaxial con deformación controlada sujetos a diferentes succiones

En la Figura 4.11¹ se muestran los resultados de los ensayos saturados, (se grafica $q = \sigma_1 - \sigma_3$ vs. ε_1 %). En estos ensayos se observa claramente que no existe dilatación. A medida que la presión de confinamiento crece, la resistencia máxima se presenta a una deformación axial cada vez mayor. Se aprecia también que en la medida que la presión de

¹ En los gráficos los símbolos que acompañan a las líneas son distintivos solamente.

confinamiento crece existe una disminución de la curvatura en las trayectorias tensión-deformación, este rasgo es más significativo en los ensayos S5 y S8. Provocando que casi se junten las curvas que representan esos ensayos con la correspondiente al ensayo S5; la zona en la que se observa más unión se localiza entre 0 y 5% de deformación axial. El ensayo S8, es el que necesita más deformación para ganar resistencia; hasta el 20% de deformación alcanza la máxima resistencia. Esta característica la notaron también Yamamuro y Lade (1996), en sus ensayos en arenas a altas presiones de confinamiento (Figura 2.6). La causa la atribuyeron a la rotura de partículas. Adicionalmente en algunos ensayos se indujeron descargas, con el objeto de obtener los parámetros elásticos del material.

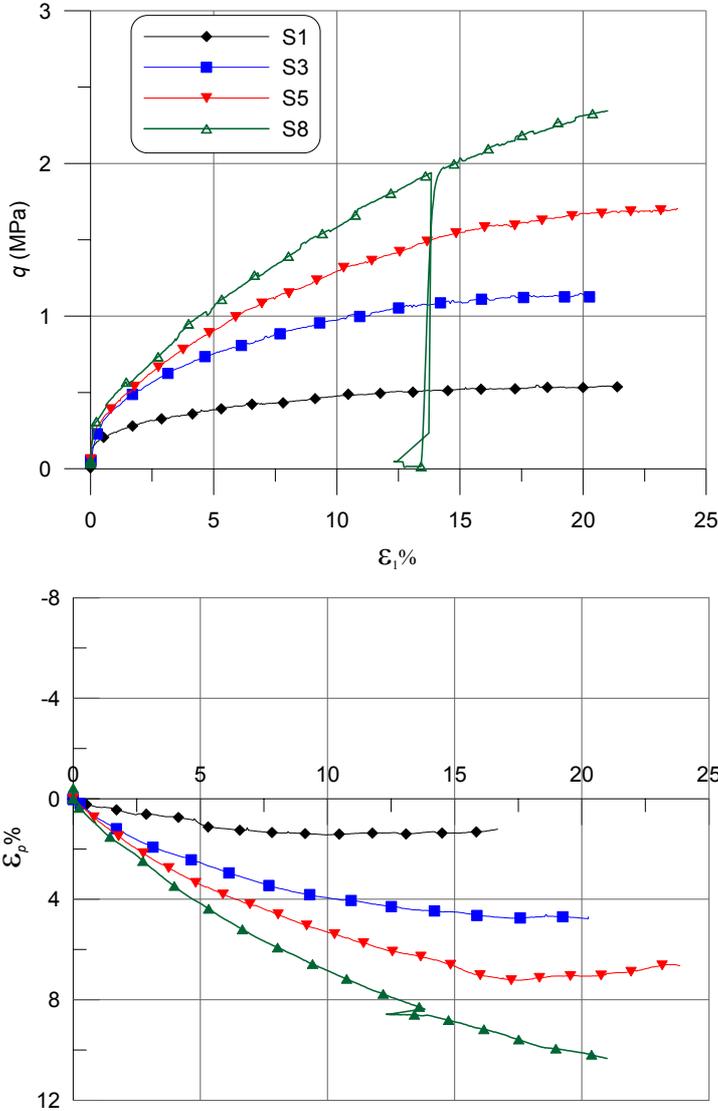


Figura 4.11 Comparación de ensayos con distinta presión de confinamiento, HR 100 %.

El comportamiento volumétrico del ensayo S1 es el menos compresivo de todos; se observa que la curva está dividida en dos secciones: la primera (de 0 a 5% de deformación axial) tiene una tendencia a la dilatación ligeramente mayor que la segunda (a partir de 5%). El límite de 5% tiene una pequeña discontinuidad producida por un repentino cambio de volumen, producido quizá, por la rotura de partículas. En la tendencia del comportamiento volumétrico de los ensayos S3, S5 y S8 se observa que tienen un inicio casi común, posteriormente siguen trayectorias diferentes con distinta curvatura. Es apreciable la disminución de curvatura a medida que se incrementa la presión de confinamiento. Los ensayos S1, S2 y S5 llegaron al punto donde la deformación volumétrica se estabiliza. El ensayo S8, necesita más deformación para alcanzar esta condición.

Las deformaciones volumétricas que se presentan en los gráficos tensión-deformación de este capítulo son calculadas con la información obtenida de las CMD. Se calculó en cada instante del ensayo el volumen de la probeta, y con el volumen inicial de referencia se obtuvieron las deformaciones volumétricas. Cuando la probeta se deforma como un barril, el cálculo del volumen puede ser erróneo sino se toma en cuenta la configuración completa de la probeta. El error es más notable en muestras que tienen una dilatación mayor (Klotz y Coop 2002). En el caso en el que se promedie las tres mediciones de las CMD, se obtendrá un diámetro mayor que el obtenido tomando en cuenta toda la configuración. La sobreestimación del diámetro se debe a que sólo se toma en cuenta la zona central donde se encuentran las CMD, y no representa toda la configuración. Para eliminar este error se ajustó una parábola con las tres mediciones de las CMD, y, los diámetros de la base y cabezal de la probeta (250 mm), se revolucionó el perfil para calcular el volumen del sólido. Con este volumen y la altura en cada momento se obtuvo un diámetro equivalente, con el que se calculó la tensión desviadora. Este procedimiento se utilizó en todos los ensayos. Como ejemplo del error que se produce en la deformación volumétrica sino se tiene en cuenta la configuración de la probeta, en la **Figura 4.12**, se presentan los resultados la deformación volumétrica del ensayo D3(36), calculados de las dos formas comentadas. Se observa como en la deformación volumétrica que corresponde al 20% de deformación axial se produce un error de 10%, sobreestimando la dilatación. Esta sobreestimación de la dilatación genera problemas si se quiere localizar la línea de estados críticos (Klotz y Coop 2002). En la parte derecha de la **Figura 4.12** se muestra una foto de

la configuración final de la probeta después de desmontar la célula triaxial en el ensayo D3(36). Se observa claramente la forma de barril, y no se observaron bandas de localización.

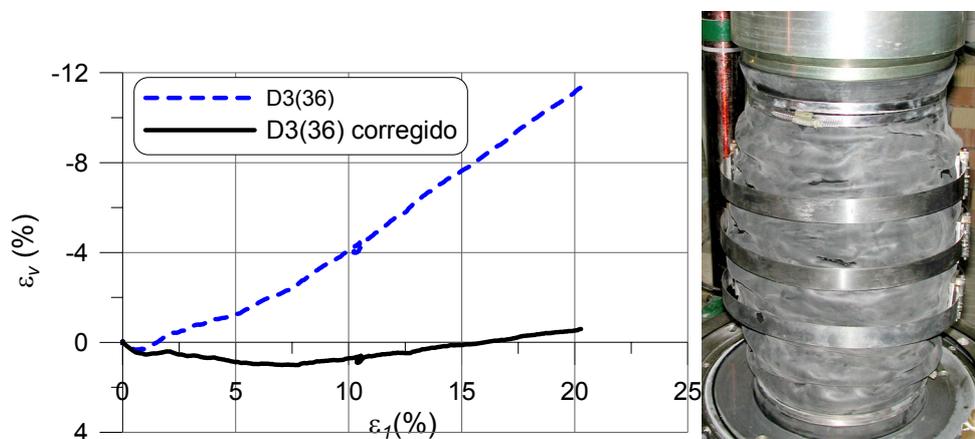


Figura 4.12 Mejora de los cálculos de deformación volumétrica después de la corrección. Ensayo D3(36)

Los ensayos con una humedad relativa de 36%, se muestran en la Figura 4.13. Esta humedad relativa se consiguió, bajando la humedad relativa inicial (aprox. de 50%) con una solución saturada de hidróxido de sodio ($\text{NaOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) en agua, colocada en el circuito de imposición de humedad. Una vez que se alcanza la humedad de 36% se retiró la solución y se dejó equilibrar por 10 horas, durante este tiempo se seguía registrando la variaciones de HR. Se observó una ligera tendencia a la baja de 2% aproximadamente. De acuerdo a la observación previa, en los siguientes ensayos la HR se dejó un 2% arriba de la deseada para que cuando se equilibrará alcanzara la HR objetivo.

Los resultados de los ensayos D1(36), D3(36), D5(36) y D8(36) presentados en la Figura 4.13 representan un comportamiento dilatante, sólo en el ensayo D8(36) la dilatancia es nula. Las curvas tensión-deformación de los ensayos D3(36), D5(36) y D8(36) tienen una zona donde las curvas se juntan; después se separan y van a alcanzar su resistencia máxima. Si se examina en detalle la zona de intersección de estos ensayos (Figura 4.14) se observa, que en la medida que crece la presión de confinamiento decrece el módulo de rigidez inicial. Lo que provoca el cruce de las curvas tensión-deformación en esta zona. Por otro lado, se observa que la deformación volumétrica no se estabiliza en los ensayos D1(36), D3(36) y D5(36), sólo lo hace en el ensayo D8(36). La deformación volumétrica del ensayo D5(36) tiene una dilatancia pronunciada a partir del 10% de deformación axial; esta tendencia no parece consistente con los otros tres ensayos, y, no se detectó causa aparente

de este comportamiento. El ensayo D8(36) no se completó debido a la ruptura la membrana cuando se alcanzó una deformación axial del 14 %. Se produjo porque la membrana, de 3 mm de espesor, quedó atrapada entre las partículas. A partir de ese ensayo se utilizaron membranas de 4 mm para evitar las rupturas.

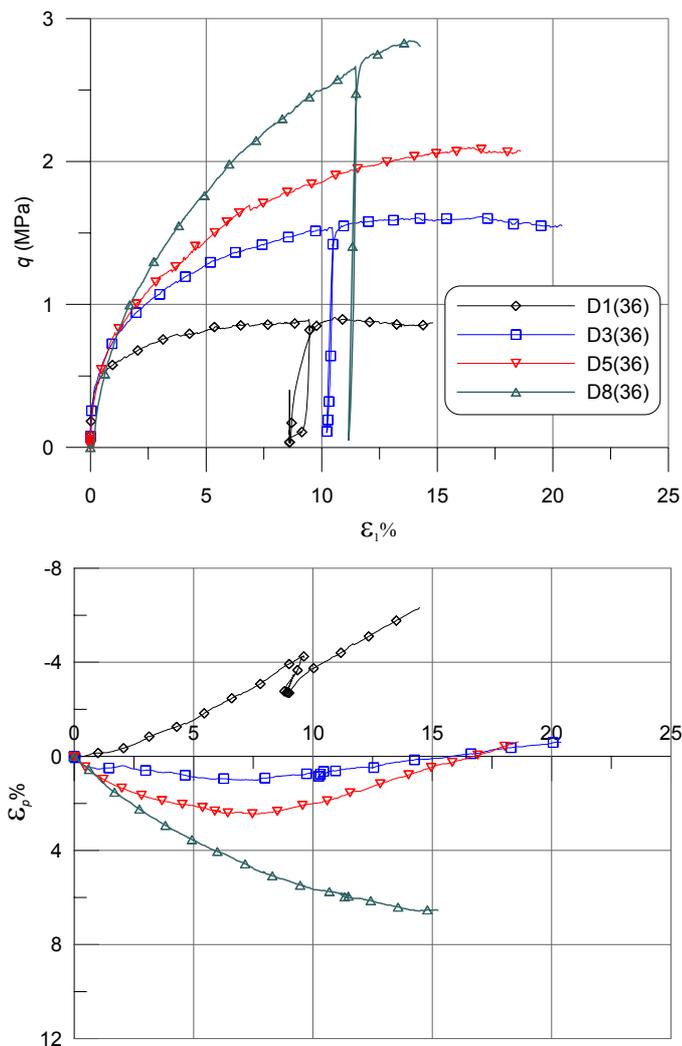


Figura 4.13 Comparación de ensayos con distinta presión de confinamiento, HR 36 %.

En las Figuras 4.15 a la 4.17, se muestra la comparación de los ensayos a distintas humedades relativas para cada presión de confinamiento. En todas ellas queda claro que la resistencia al corte del material varía con la humedad relativa (o succión). Cuanto menor es la humedad relativa (succión mayor), la resistencia aumenta. La proporción en que aumenta la resistencia depende la presión de confinamiento aplicada. En los ensayos con $\sigma_3 = 0.1$ MPa existe una curva intermedia a las de humedad relativa de 100% y 36%, que corresponde a la una humedad de 92%, muy cercana a la de 36%. El incremento de la resistencia con la succión no es lineal para esta presión de confinamiento, y se distinguen

fuertes cambios de resistencia en el rango de 92 a 100% de HR. En cuanto a las deformaciones volumétricas, se observa que dilatan más el material que tiene HR menores. El ensayo D1(92), posee un comportamiento dilatante que se asemeja más al del ensayo D1(36), a pesar de que se encuentra a una HR cercana al 100%.

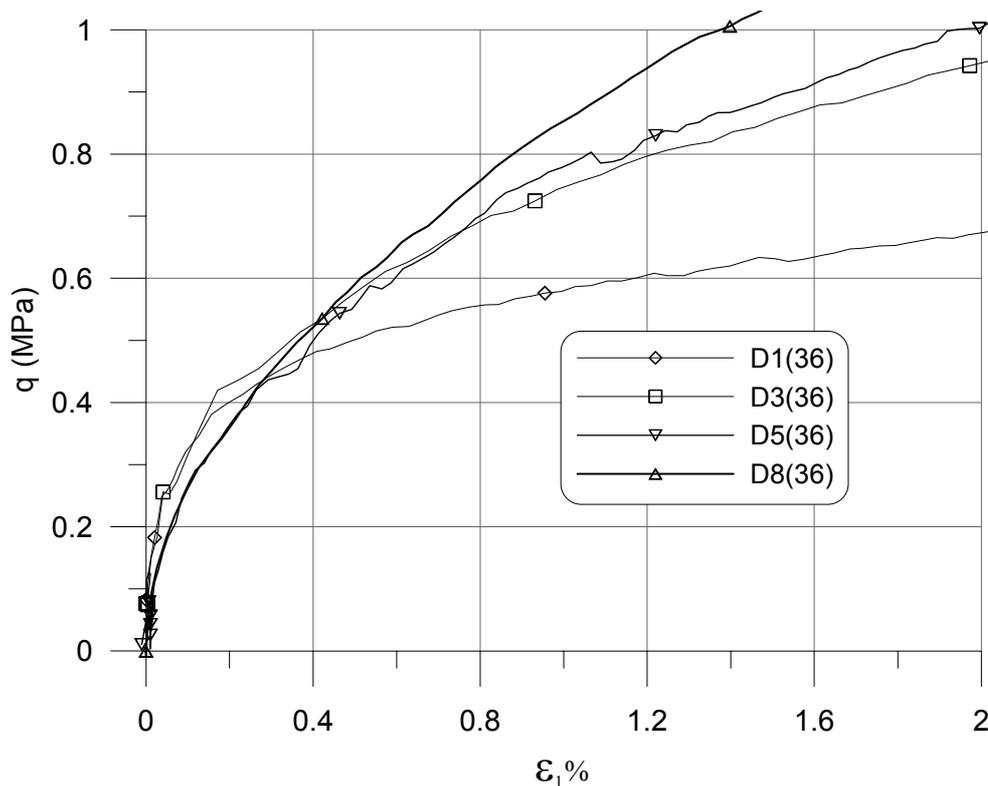


Figura 4.14 Comportamiento desviador en deformaciones hasta 2% de los ensayos con HR 36%.

Analizando los ensayos que corresponden a un $\sigma_3 = 0.3$ MPa, se observa que la tendencia del ensayo con HR intermedia cambia respecto a la presión de confinamiento anterior (ver Figura 4.15). La curva de resistencia al corte del ensayo D3(92) se acerca más a la que le corresponde el 100% de HR. A pequeñas deformaciones, las curvas anteriores, tienen la misma resistencia, y después la curva del ensayo D3(36) tiende a separarse gradualmente de la del ensayo S3, ganando resistencia. En las curvas de deformación volumétrica es evidente que el ensayo D3(92) tiene aproximadamente el mismo comportamiento que el ensayo saturado. Observando con más detalle se aprecia que, la primera parte de la curva tiene una dilatación ligeramente mayor, y posteriormente a una deformación axial del 12% cruza a la del material saturado. El comportamiento del material no es consistente con los ensayos efectuados con HR de 36 y 100%. Esta inconsistencia es debida a que el material

utilizado para el ensayo fue el Material 2; y como se vio este material se deteriora más cuando se somete a carga mecánicas. Todos los ensayos que se realizaron con HR intermedia a 36 y 100%, fueron hechos con el Material 2.

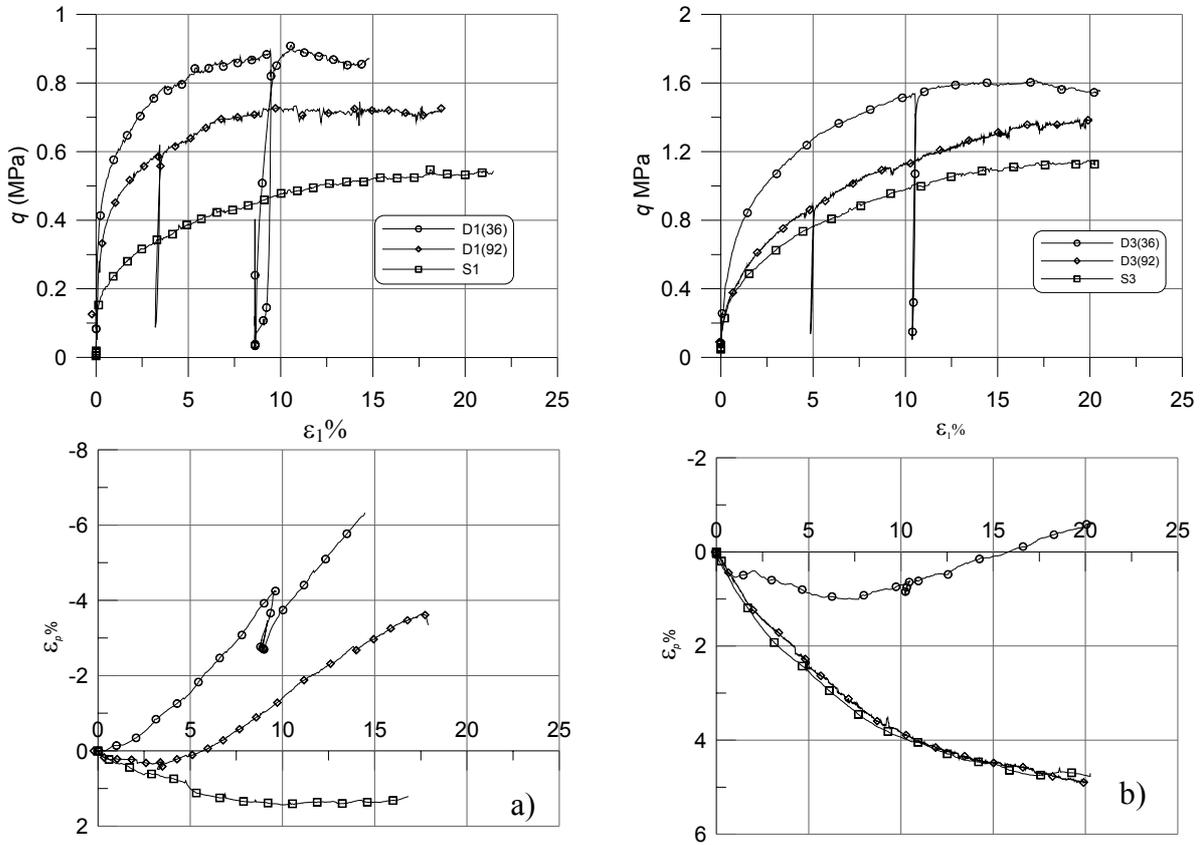


Figura 4.15 Comparación de los ensayos con diferentes humedades relativas, $\sigma_3 = 0.1$ y 0.3 MPa

Comparando la tendencia del ensayo D1(92) con el D3(92) referido a los ensayos con HR extrema de 36 y 100%. Se puede decir que la curva tensión-deformación del ensayo D3(92) tiene menor curvatura, a deformaciones pequeñas está más tendida. Esta característica es indicio de que se está produciendo más rotura de partículas en esta zona. Y lo anterior es corroborado por la deformación volumétrica que tiene el material. El material se rompe y reacomoda continuamente, lo que produce características como las mostradas en los resultados del ensayo D3(92).

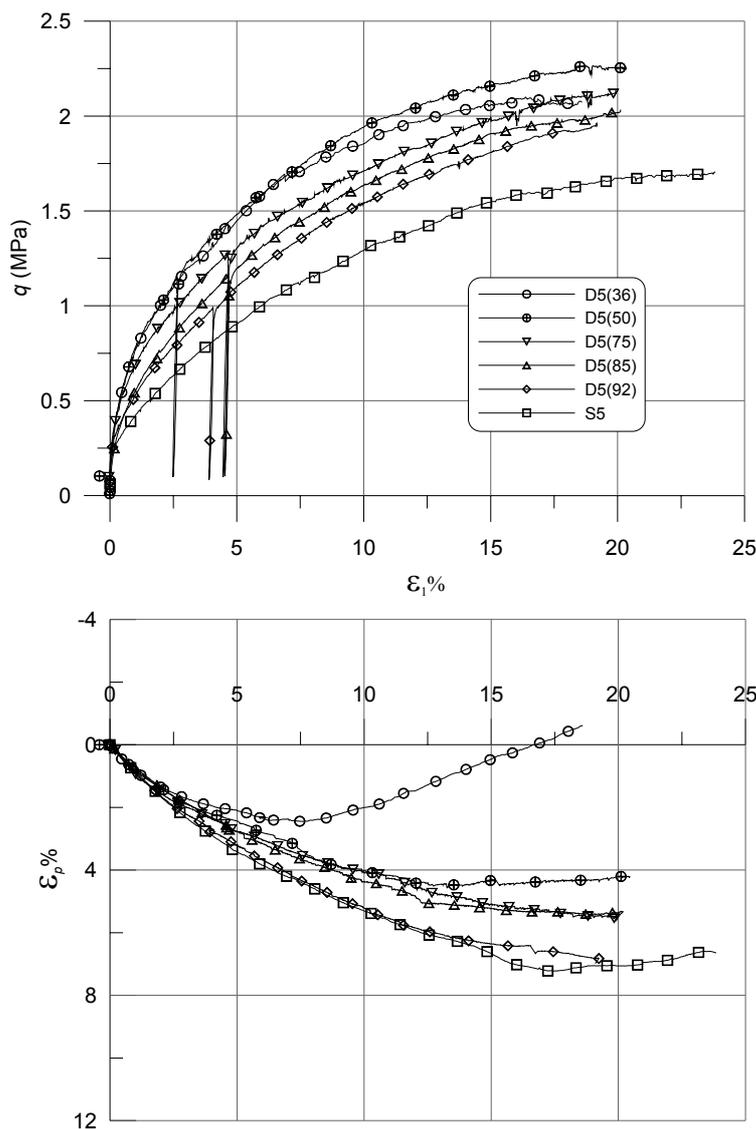


Figura 4.16 Comparación de los ensayos con diferentes humedades relativas, $\sigma_3 = 0.5$ MPa

A una presión de confinamiento de 0.5 MPa (ver Figura 4.16) se realizó una caracterización más completa de la influencia de la succión en la resistencia al corte y deformación volumétrica. En los resultados se observa una variación uniforme de la resistencia al corte en los ensayos con HR intermedia. Si la tendencia de estos ensayos se compara con la de los ensayos con HR extremas (36 y 100%), se nota que estos ensayos tienen una ligera tendencia a resistir más. Incluso el D5(52) supera al ensayo D5(36) a partir de un 7.5% de formación axial. Por otro lado, el comportamiento volumétrico sigue presentando grandes deformaciones. El ensayo con HR de 92% se tiene otra vez la misma deformación que el de HR de 100%. Los otros tres ensayos: D5(52), D5(75) y D5(85); tienen una trayectoria semejante una deformación axial de 10%. En esta

parte el ensayo D5(52) tiene una dilatancia mayor, los otros dos siguen la misma trayectoria. El comportamiento volumétrico es muy errático y no muestra una tendencia clara.

A un $\sigma_3 = 0.8$ MPa no se hicieron ensayos con HR intermedia (ver Figura 4.17). La inspección entre los ensayos seco y saturado para esta presión de confinamiento, deja ver que sigue existiendo diferencia en la resistencia al corte. En el comportamiento volumétrico existe menos diferencia. La probeta seca dilata ligeramente más que la saturada.

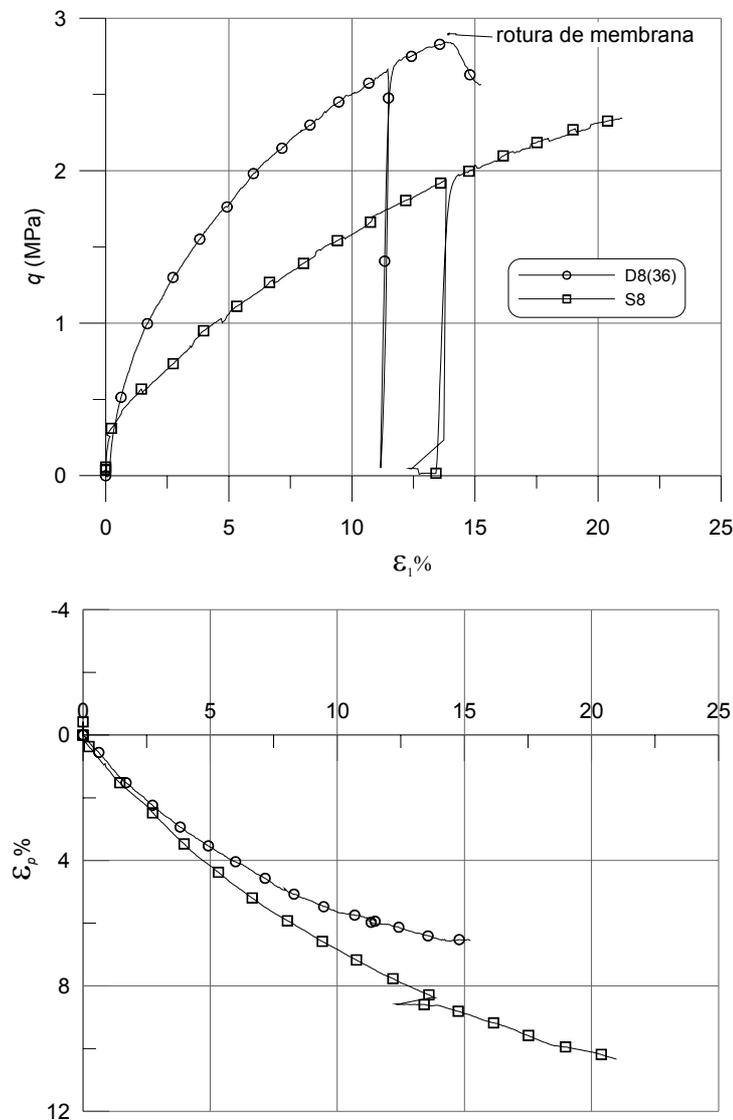


Figura 4.17 Comparación de los ensayos con diferentes humedades relativas, $\sigma_3 = 0.8$ MPa

En la Figura 4.18 se muestran las granulometrías obtenidas después de los ensayos saturados y los con HR 36%. También se muestra como referencia la granulometría original y la que se obtuvo después de la compactación. Las granulometrías de los ensayos saturados muestran una evolución continua a medida que la presión de confinamiento crece. Por el contrario en los ensayos hechos con HR de 36%, la evolución se ve truncada a una presión de confinamiento de 0.3 MPa. Es evidente que se produce menor rotura en los ensayos secos.

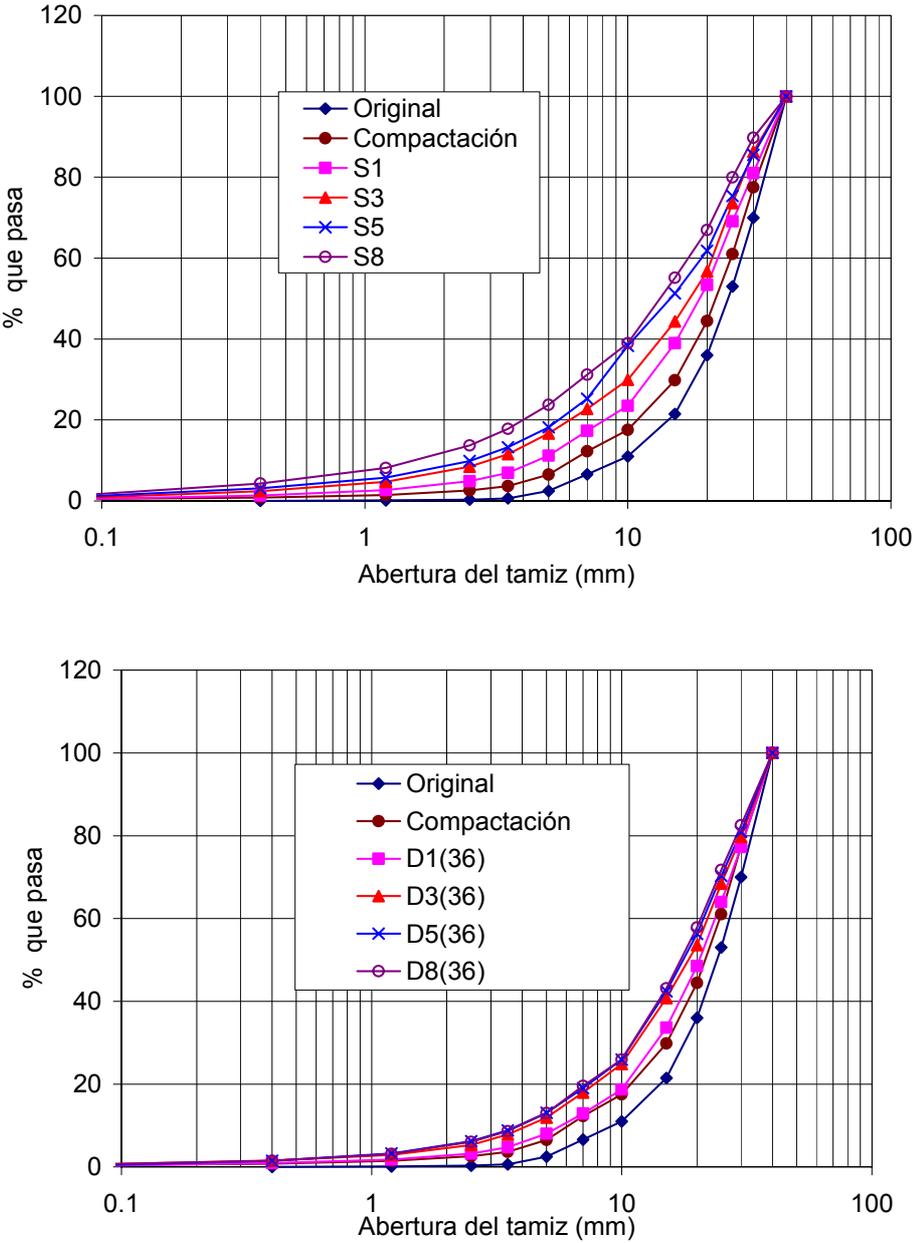


Figura 4.18 Granulometrías después de la compactación, ensayos saturados y 36% de HR.

Para ver la evolución de la granulometría desde otro punto de vista, en la Figura 4.19 se representan los porcentajes retenidos en cada tamiz en función del diámetro del tamiz en el que se retienen. Se muestran sólo las granulometrías después de la compactación, y las que corresponden a los ensayos con una presión de confinamiento de 0.3 y 0.8 MPa; para dos HR 100 y 36%. Se aprecia claramente como las partículas grandes tienden a disminuir de tamaño, en los ensayos saturados estas partículas se rompen más que en los secos. Posteriormente se observa como para las partículas retenidas en el tamiz de 10 mm se invierte la tendencia; existe mayor cantidad de partículas de este tamaño y de los menores a él. Este comportamiento es indicativo de que la rotura de partículas se genera en las aristas de las partículas de mayor tamaño, para poder general así partículas pequeñas.

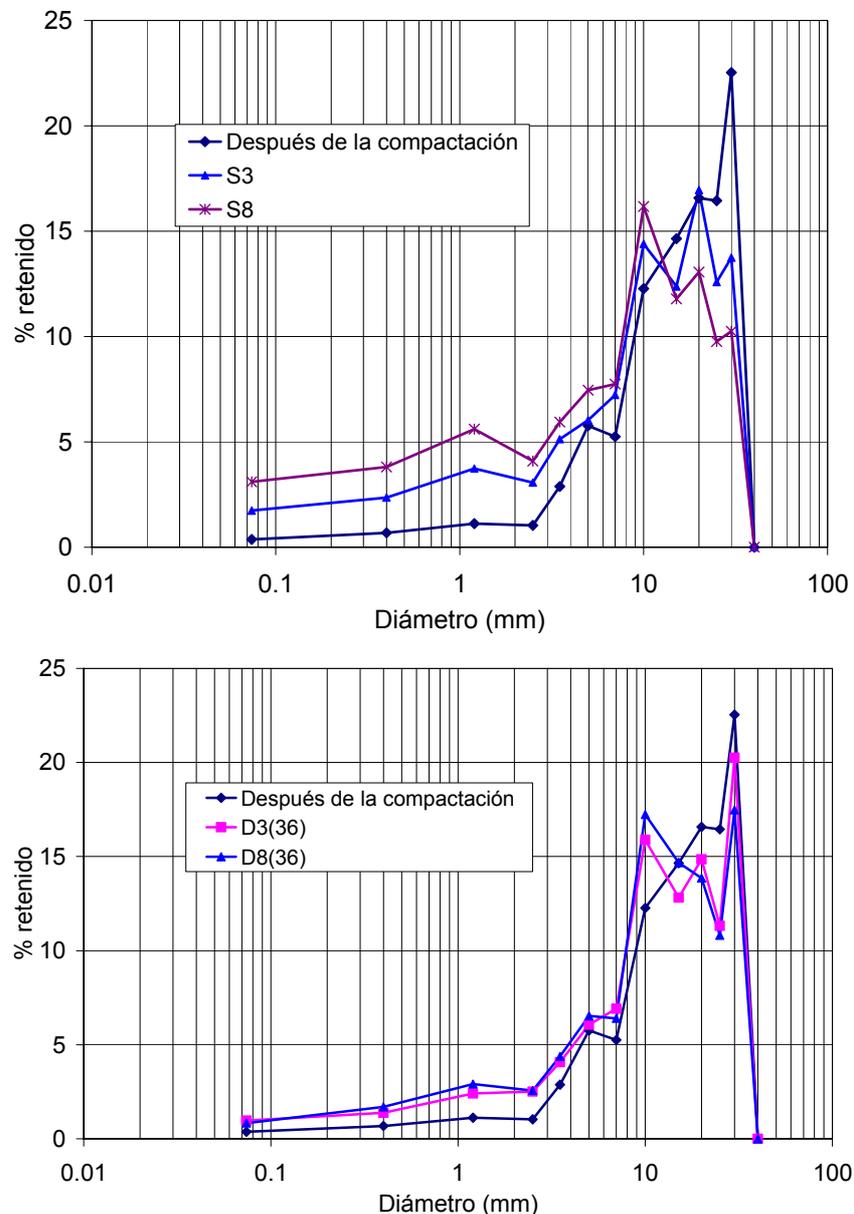


Figura 4.19 Evolución de los porcentajes retenidos en los tamices. Ensayos S y D(36).

En la Figura 4.20, se muestran las granulometrías que corresponden a distintas HR pero a una misma presión de confinamiento. Se observa que, un cambio en la HR involucra un cambio en la resistencia del material; cuanto mayor es la HR mayor rotura de partículas se presenta. Examinando cada figura en detalle. Se observa que en la Figura 4.20a la curva que corresponde al ensayo D1(92) pasa a la que corresponde al ensayo S1; esto demuestra que la mecánica entre partículas fue diferente de la de los ensayos S1 y D1(36). La Figura 4.20b muestra una evolución creciente de la granulometría con la HR, y los resultados del ensayo D3(92) sobrepasan la curva del ensayo S3. En los resultados de los ensayos con presión de confinamiento de 0.5 MPa, sólo el ensayo D3(36) muestra una granulometría intermedia, los otros presentan curvas que se traslapan entre si. Viendo más detalladamente los traslapes, se aprecia que las curvas correspondientes a HR intermedias pasan a la del ensayo S5, en los tamaños mayores a 15 mm. Estos datos nos muestran evidencia de que el Material 2 se es más frágil que el Material 1, por tanto su comportamiento es diferente.

A partir de estos datos se calcularon los parámetros de rotura de Marsal (B_g) y el de Hardin (B_r). Se representan en función de la presión de confinamiento σ_3 en la Figura 4.21. El punto correspondiente a $\sigma_3 = 0$, es el valor que define la rotura de partículas después de la compactación. Los dos parámetros siguen la misma tendencia; la rotura de partículas del material saturado es más grande que la producida en los ensayos con HR de 36%. Si observamos la variación del parámetro de Hardin (línea con puntos), en el caso de la HR del 100%, se observa como la rotura tiende a crecer linealmente con la presión de confinamiento; su tendencia posterior a $\sigma_3 = 0.8$ MPa es de seguir creciendo. En los ensayos con HR de 36%, la rotura que se produce es menor. En el ensayo D1(36) no existe rotura de partículas, pero a continuación se produce un incremento significativo. Sin embargo, se aprecia una tendencia a estabilizarse a tensiones mayores.

En la Figura 4.22 se ha representado el índice de rotura de Hardin en función de la humedad relativa para distintas presiones de confinamiento. Se observa una dependencia lineal en general. La curva que corresponde a una presión de confinamiento de 0.5 MPa tiene una tendencia más errática.

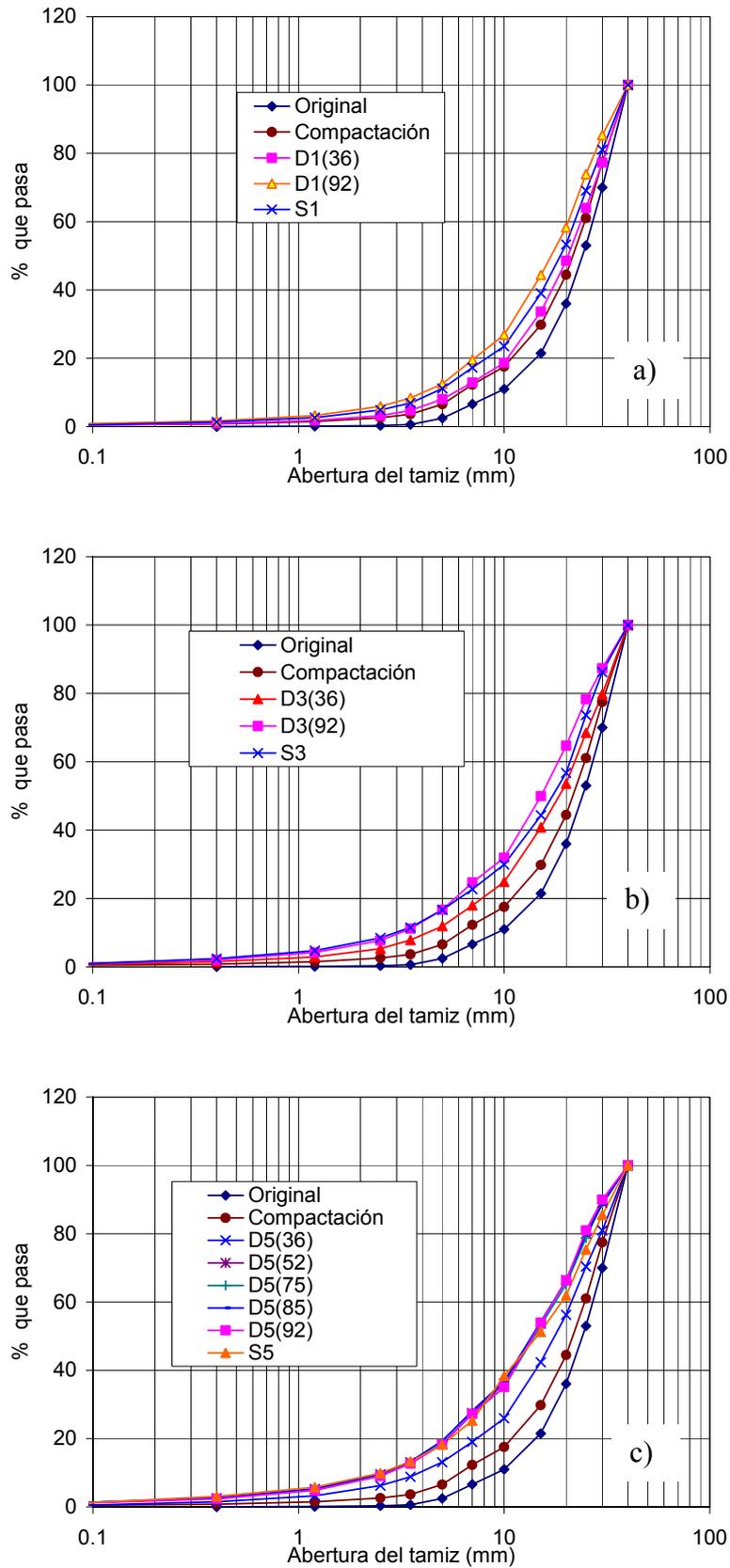


Figura 4.20 Comparación de granulometrías obtenidas después del ensayo para una misma presión de confinamiento. a) $\sigma_3 = 0.1$ MPa, b) $\sigma_3 = 0.3$ MPa y c) $\sigma_3 = 0.5$ MPa

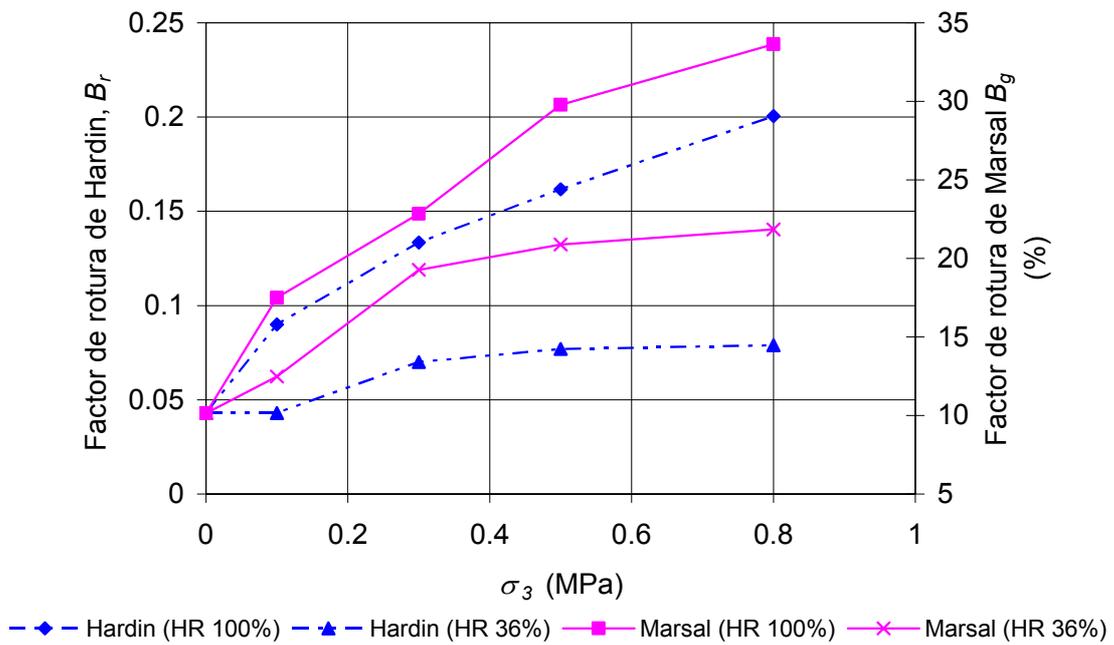


Figura 4.21 Rotura obtenida para los ensayos, saturados y con HR 36%.

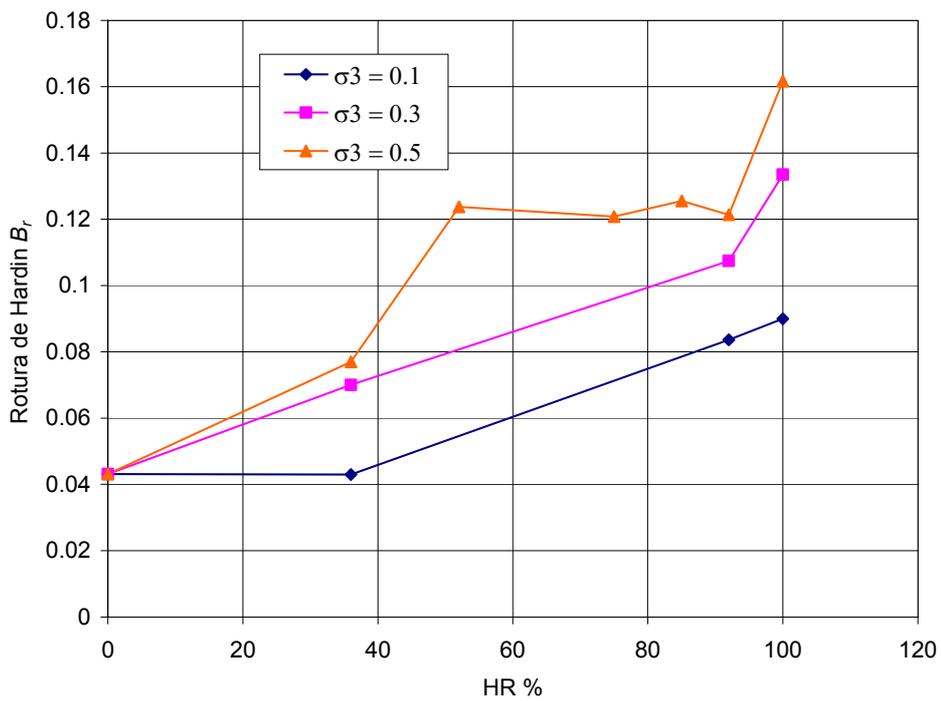


Figura 4.22 Influencia de la HR en la rotura del material, para distintas presiones de confinamiento.

4.5 Línea de estado crítico

El estado crítico se define como la condición última, donde la deformación plástica de corte puede continuar indefinidamente, sin cambio volumen o tensión efectiva (Wood 1990). Esta línea está definida en el espacio p' - q - v . El estado crítico se alcanza cuando se cumple la condición siguiente:

$$\frac{\partial p'}{\partial \varepsilon_q} = \frac{\partial q}{\partial \varepsilon_q} = \frac{\partial v}{\partial \varepsilon_q} = 0 \quad (4.1)$$

donde $p' = 1/3 (\sigma_1' + \sigma_2')$, $q = \sigma_1' - \sigma_3'$, $\varepsilon_q = 2/3 (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$. En condiciones límites de corte se define el parámetro M_{cr} , como:

$$\frac{q_{cr}}{p'_{cr}} = \eta_{cr} = M_{cr} \quad (4.2)$$

La línea de estado crítico se utiliza como herramienta en la formulación de modelos elasto-plásticos de las arcillas. El modelo Cam-Clay ha hecho muy popular el concepto de estado crítico, por su simplicidad y capacidad de reproducir el comportamiento de las arcillas. El estado crítico no tiene la misma aceptación en materiales granulares, aunque en los últimos años se han desarrollado técnicas de laboratorio para identificarlo (Been *et al.* 1991, Klotz y Coop 2002). Se han desarrollado también modelos elasto-plásticos para arenas donde se incorpora la línea de estado crítico (Manzari y Dafalias 1997, Gajo y Wood 1999, Wan y Guo 1999). En materiales granulares gruesos no se conocen estudios experimentales destinados a obtenerlo.

Dado el beneficio que se puede obtener desde el punto de vista de la modelación con el concepto de estado crítico en escolleras, se examinará esta cuestión a partir de los resultados experimentales obtenidos. Si analizamos los resultados presentados anteriormente, y, las trayectorias v - p resultantes de los ensayos saturados y con humedad relativa de 36% (ver la Figura 4.23), se observa que no en todos los casos se cumple la condición de estado crítico definida por la ecuación (4.1), pero hay una tendencia clara de los ensayos a definir una condición de estado crítico. En la Figura 4.23 se muestra el estado último que se alcanzó para cada ensayo (círculos y cuadros de mayor tamaño). Si se ajusta una línea recta (línea punteada en la Figura 4.23) a los cuatro puntos en cada condición de HR se obtiene un coeficiente de correlación muy alto. Se observan dos líneas casi paralelas entre sí con una posición claramente diferente. Para fines prácticos se puede suponer que la

posición de la línea de estado crítico para escolleras depende claramente del contenido de humedad o de la succión.

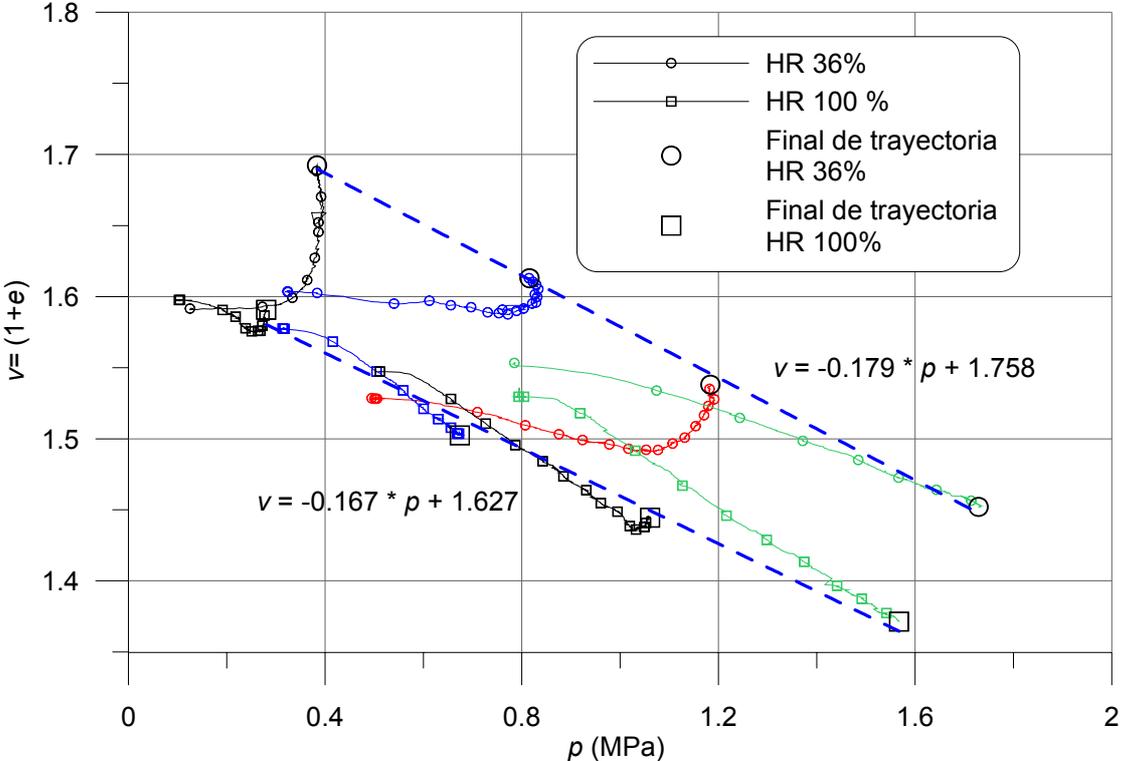


Figura 4.23 Trayectorias de $v-p$ y líneas de estado crítico para los ensayos con humedad relativa de 36% y 100%.

Si interpretamos los resultados en base a la idea de Biarez y Hicher (1997) (ver figura 2.11), los resultados de la Figura 4.23 se encuentran en la zona donde la rotura de partículas es significativa (ya que para escolleras se presenta a tensiones mucho menores que para arenas). De acuerdo a la idea de Biarez y Hicher si hay una disminución en la tendencia de la rotura de partículas se refleja en la línea de estado crítico. En los ensayos con HR = 36% se observa una tendencia a la estabilización la rotura de partículas, ver Figura 4.21. En los resultados presentados existen este tipo de tendencias pero no muy significativas y no se reflejan en la línea de estado crítico de la Figura 4.23.

Para ver la variación de la posición de la línea de estado crítico con la humedad relativa, se grafica en la Figura 4.24 las trayectorias $v-p$ de los ensayos con diferentes humedades relativas y $\sigma_3 = 0.5$ MPa. El estado último de cada ensayo se identifica con un círculo con una cruz en medio. Es distintiva concentración de los puntos cerca de la línea de estado

crítico saturada. Por el contrario, el ensayo correspondiente a una humedad relativa de 52% se separa ligeramente hacia la línea de estados críticos de HR 36%. Se puede concluir que, con la evidencia experimental presentada no es posible mostrar claramente la influencia de la HR en la línea de estados críticos, a diferencia de los que se ha obtenido en relación con la resistencia al corte. Quizá el hecho de que los ensayos con las humedades relativas intermedias se hicieron con material algo diferente influye sobre los resultados.

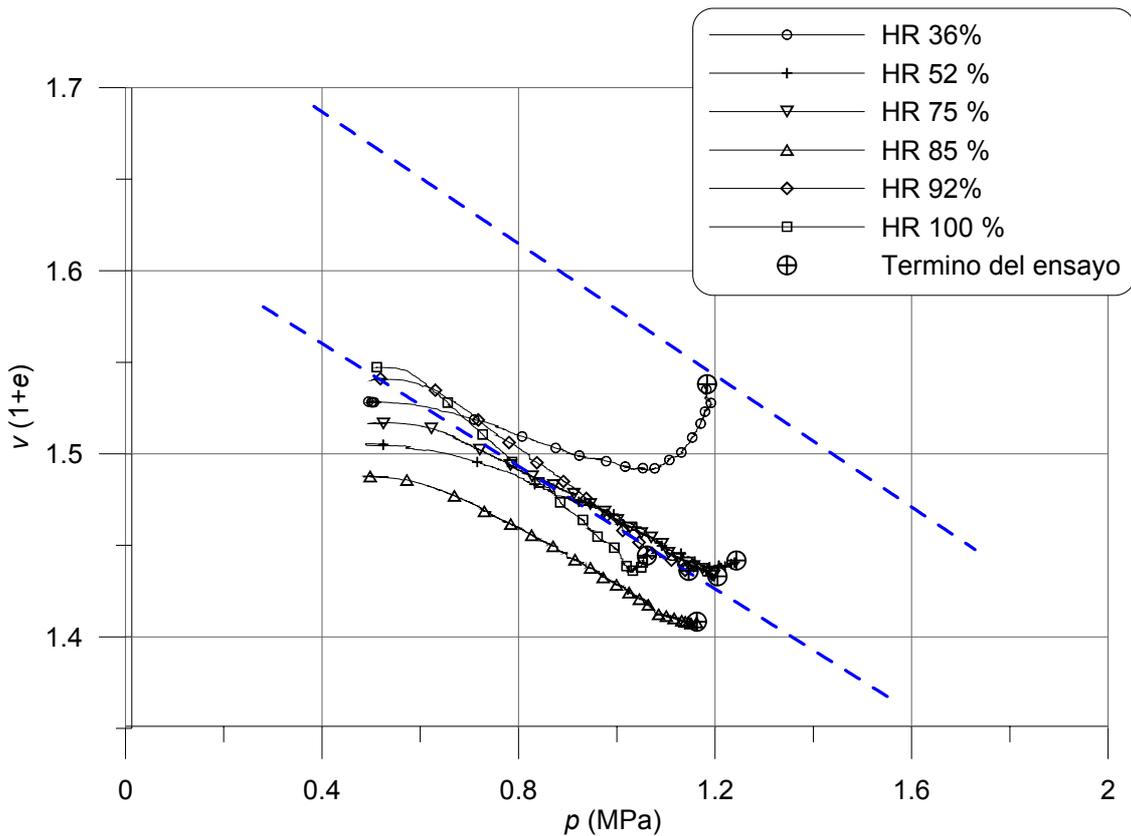


Figura 4.24 Trayectorias v - p de los ensayos con una presión de confinamiento 0.5 MPa y diferentes humedades relativas.

En la Figura 4.25 se representan los puntos p_{cr} - q_{cr} (puntos últimos en los ensayos) para cada ensayo. En el gráfico, los ensayos correspondientes a una misma humedad relativa se ajustan a una línea de regresión del tipo potencial. Se traza una línea continua para representar la curva de regresión obtenida, en los tres ajustes se obtiene un coeficiente de correlación alto ($r^2 = 0.999$). La pendiente, M_{cr} , definida en la ecuación (4.2) cambia con la presión de confinamiento y la humedad relativa. Este gráfico, muestra que M_{cr} disminuye con la presión de confinamiento y cuando aumenta la humedad relativa. Este fenómeno se

atribuye a la rotura de partículas de acuerdo al razonamiento hecho en el apartado 2.1, referente al estado crítico.

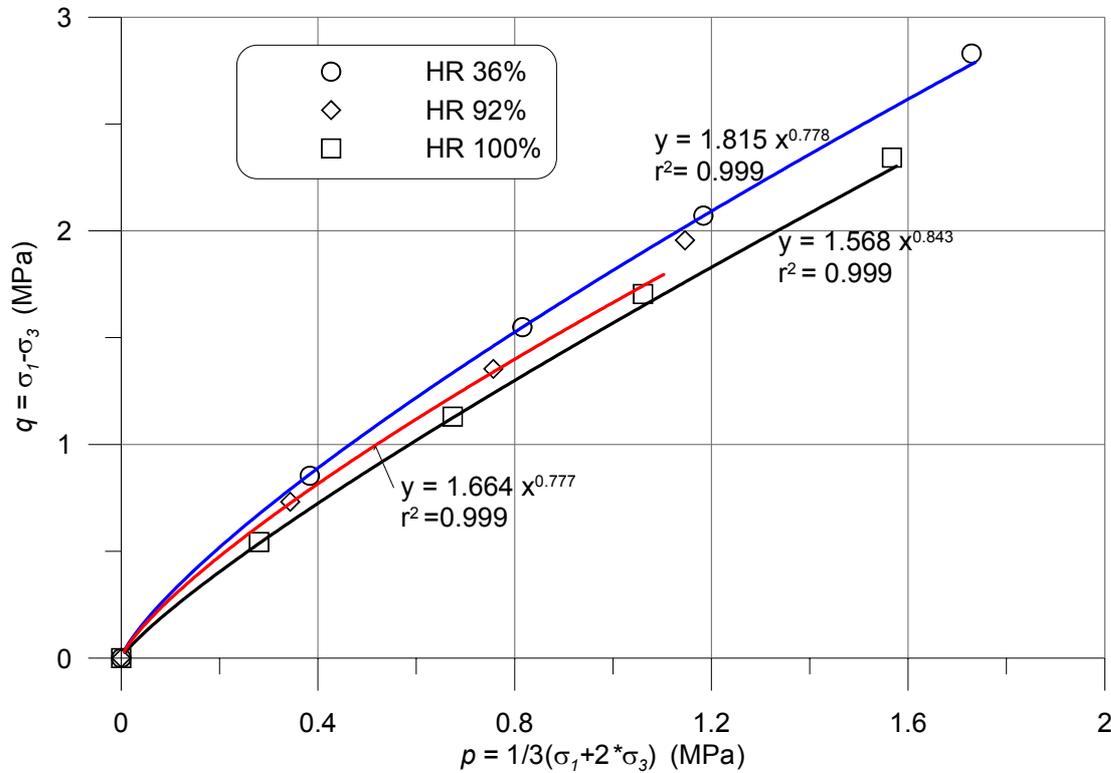


Figura 4.25 Puntos p_{cr} , q_{cr} para los ensayos con humedad relativa de 36%, 92% y 100%.

4.6 Ensayos de compresión triaxial con cambio de humedad relativa bajo carga vertical constante

El primer ensayo se realizó con una presión de confinamiento de 0.3 MPa. Se inició cargando la muestra con la interfase aire-aceite (control de tensiones), manteniendo en lo posible una velocidad de deformación constante similar a la utilizada en los ensayos con control de deformación. La regulación de la velocidad se hizo incrementando manualmente del caudal del aire comprimido que suministra a la interfase aire-aceite. Cuando se acercó la tensión desviadora de 0.8 MPa se disminuyó la velocidad para cuidar que no se cruzará este límite y así posteriormente mantener la vertical constante deseada.

A partir de este punto la muestra se fue humedeciendo de una manera controlada, colocando diferentes soluciones de agua y sal, saturadas (las indicadas en la tabla 3.2) en el circuito de circulación de aire del equipo. Se midió con el higrómetro en todo momento

el aumento de la HR. Para mantener un gradiente de HR elevado y agilizar su cambio, cuando la HR impuesta alcanzó 90% se eliminó el uso de soluciones salinas, empleándose sólo agua destilada. Con este procedimiento al cabo de 9 días se registró en el higrómetro una humedad relativa del 98%. En estas condiciones de HR el higrómetro tiene una precisión de $\pm 2\%$, así que era preciso vigilar la deformación para detectar el punto donde el humedecimiento dejara de producir deformaciones. En esta etapa, la probeta se deformaba verticalmente a una velocidad de 2.26×10^{-5} mm/seg. Además, la deformación axial desde el inicio de la imposición de la HR hasta ese momento era 5.01%. Esta deformación superaba la que le correspondía al ensayo S3, con el mismo desviador. Con estos antecedentes como referencia, se esperaba que el material ya no se deformara mucho más, así que se decidió inundar la muestra con agua. Como resultado se presentó una deformación adicional del 6.35% en un periodo de un día, para llegar a un total 13.13% de deformación axial durante el humedecimiento. Después de esta respuesta es evidente que el material antes de la saturación no alcanzó el 100% de la HR.

En la Figura 4.26, se muestran los resultados de este ensayo comparados con los resultados de los ensayos S3, D3(36) y D3(92). En la figura se indican con flechas el inicio de las etapas mencionadas. La etapa de cambio de humedad relativa con vapor de agua está limitada por la aplicación de la tensión constante, y la pequeña disminución de tensión desviadora producida por la inundación de material. En esta etapa la carga vertical tiene ligeras variaciones debido a las oscilaciones producidas por el compresor, que suministra el aire comprimido al regulador. La zona contigua, que representa la zona de deformación por inundación, tiene menos ruido ya que no está afectada por las variaciones temporales del suministro del compresor. La carga vertical no se vio muy afectada por la velocidad de deformación de la probeta.

Por último el ensayo se terminó con control de deformación, utilizando la bomba de aceite. Al inicio de la recarga con deformación constante, se observa un incremento instantáneo de la resistencia del material; posteriormente la muestra sigue ganando resistencia, pero no alcanza la obtenida en el ensayo S3.

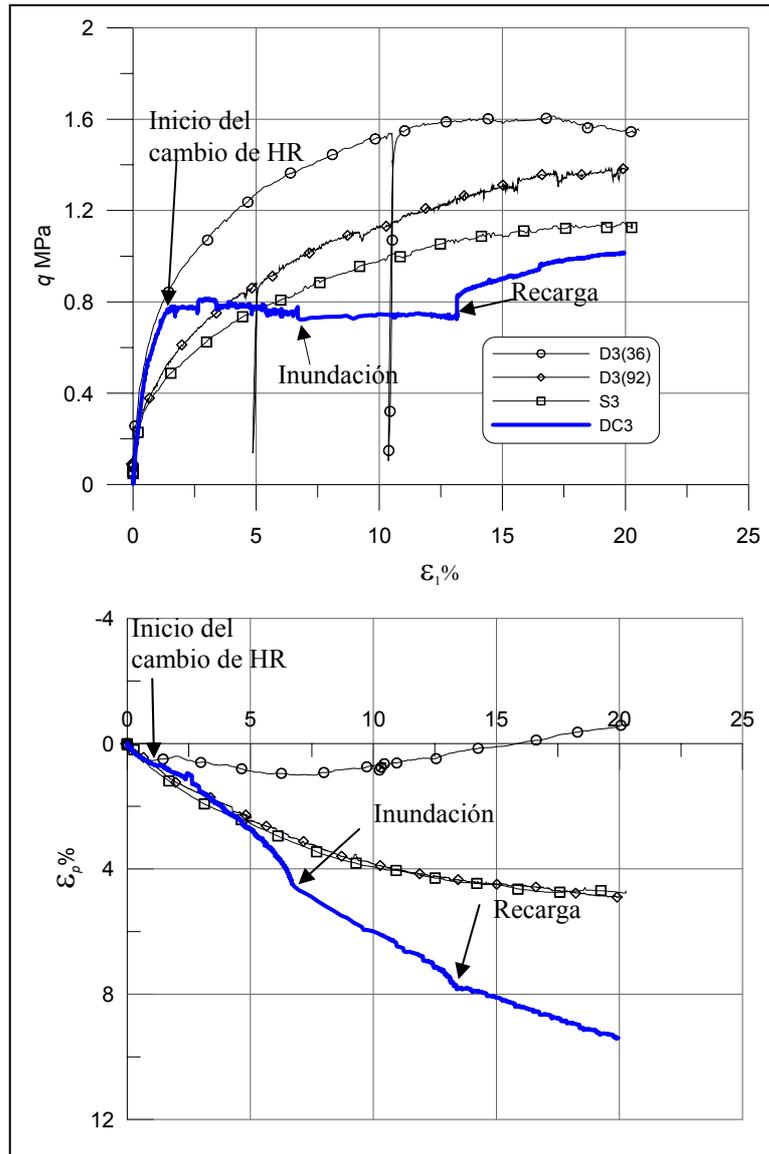


Figura 4.26 Comparación de los ensayos con humedad relativa constante y uno donde varía la humedad relativa de 36 a 100%, con desviador constante. $\sigma_3 = 0.3$ MPa.

La deformación volumétrica partió de la trayectoria del ensayo D3(36) y rebasó la del ensayo S3. La causa de la gran deformación observada en éste ensayo, es seguramente la deformación de fluencia acumulada durante el tiempo de realización del ensayo. La deformación presentada cuando se inundó el material, fue gran medida sorprendente, debido a que en los ensayos edométricos realizados por Oldecop (2000) no se presentó. En los ensayos realizados por Oldecop, después del humedecimiento o inundación las deformaciones volumétricas obtenidas eran similares a las del ensayo saturado. Otro factor que pudo ser significativo, es la pequeña succión matricial que tenía el material antes de la

saturación. Con la técnica de equilibrio de vapor no es posible controlar estas succiones tan pequeñas. De acuerdo con este ensayo, la deformación temporal de colapso se ve incrementada por la aplicación de una tensión desviadora, sobre todo si la magnitud de la tensión a la que se cambia la humedad está muy cercana a la resistencia al corte del material saturado.

Para conocer más sobre la dependencia temporal de la deformación del material, se hizo otro ensayo, el DC5. En esta ocasión se inundó el material de una manera instantánea, a una tensión constante de 1.2 MPa. El tiempo que tuvo la muestra para deformarse antes de continuar la etapa de carga controlada, fue de 30 min. En este ensayo la deformación axial sobrepasó a la del ensayo S5 un 3% (ver Figura 4.27). En la etapa posterior de deformación controlada se observó que la probeta iba ganando resistencia de manera paralela al ensayo S5, y en su última fase se acerca un poco más.

En la Figura 4.28 se representan los datos de las deformaciones axiales y volumétricas en función del tiempo; desde el inicio hasta el final del ensayo DC5. Al punto 1 de la Figura 4.27, le corresponde el tiempo 0 en la Figura 4.28; al punto 2 le corresponden el tiempo de estabilización de la deformación con la carga vertical constante que está ente 4.5 y 20.5 min, en este último tiempo se inundo la probeta; y en el minuto 49 se reinicio la carga con deformación controlada. En la figura se observa que cuando se inunda la probeta existe una deformación casi instantánea, que se produce en los 10 primeros minutos, posteriormente existe una reducción muy drástica de la velocidad de deformación, y por último, tiende a tomar una velocidad aproximadamente constante a los 30 minutos. El pequeño círculo sobre la curva de deformación axial señala el cambio de pendiente. La deformación instantánea en la inundación se asocia al reblandecimiento de las aristas de las partículas; la segunda pendiente representa el efecto que produce el agua sobre la partícula cuando penetra dentro de ella. La dinámica de la deformación anterior es explicable mediante el concepto de doble porosidad de un material (Alonso y Oldecop 2000). La velocidad de deformación al final de la etapa de inundación es la pendiente de la recta punteada que se traza en la Figura 4.28. La penetración del agua dentro de los poros y su efecto en la deformación temporal, continuó en la última etapa del ensayo (16 min), efectuada con la prensa en deformación controlada. Para descontar este efecto de la deformación temporal

producida por la penetración del agua en las partículas, se supone que tiene un valor constante y es igual a la pendiente de las rectas punteadas trazadas en la Figura 4.28.

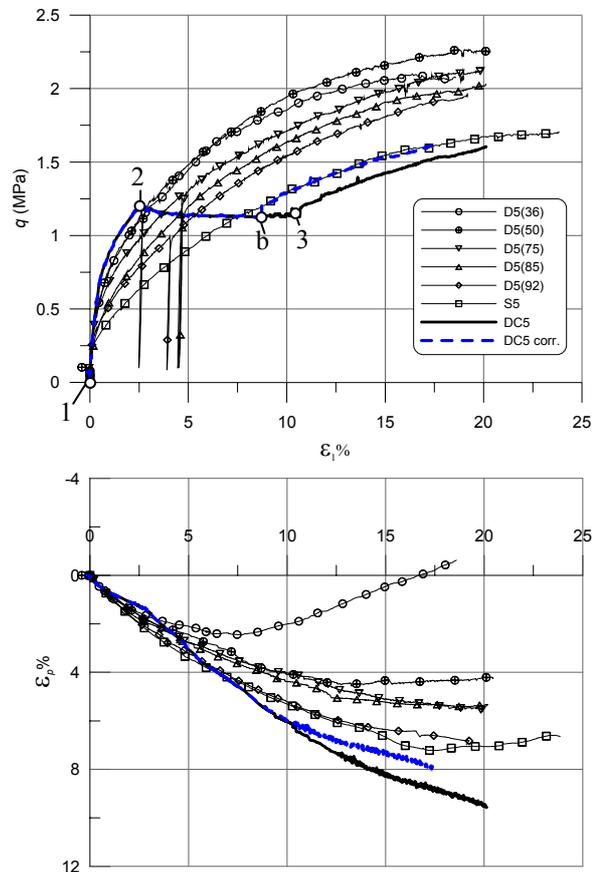


Figura 4.27 Resultados del ensayo DC5 en comparación con los hechos con la presión de confinamiento de 0.5 MPa.

Podemos corregir los datos del ensayo DC5, eliminando en lo posible el efecto temporal del agua sobre las partículas, para así hacer comparables los datos de este ensayo con los de los otros. Se considera que el único mecanismo de deformación que genera el agua es el producido por reblandecimiento de las aristas de las partículas. Por tanto, la primera corrección es eliminar la deformación desde del pequeño círculo en la curva de la Figura 4.28 hasta el final de la etapa de inundación; ya que las deformaciones a partir del círculo representan más el efecto de la intrusión del agua en las partículas. En la segunda corrección, se eliminan las deformaciones que se siguieron produciendo por efecto del reblandecimiento de las partículas en la intrusión del agua hacia el interior de las partículas; que se supone, como se dijo en el párrafo anterior, igual a la pendiente de las

rectas punteadas en la Figura 4.28. Efectuando las correcciones mencionadas a los resultados originales, se obtienen unos datos comparables con los ensayos de deformación controlada. La corrección se muestra con línea interrumpida en la Figura 4.27. En la parte desviadora se observa que el ensayo DC5, sigue fielmente al ensayo S5. En la parte volumétrica el ensayo DC5, se parece más al S5, aunque se miden unas deformaciones algo superiores.

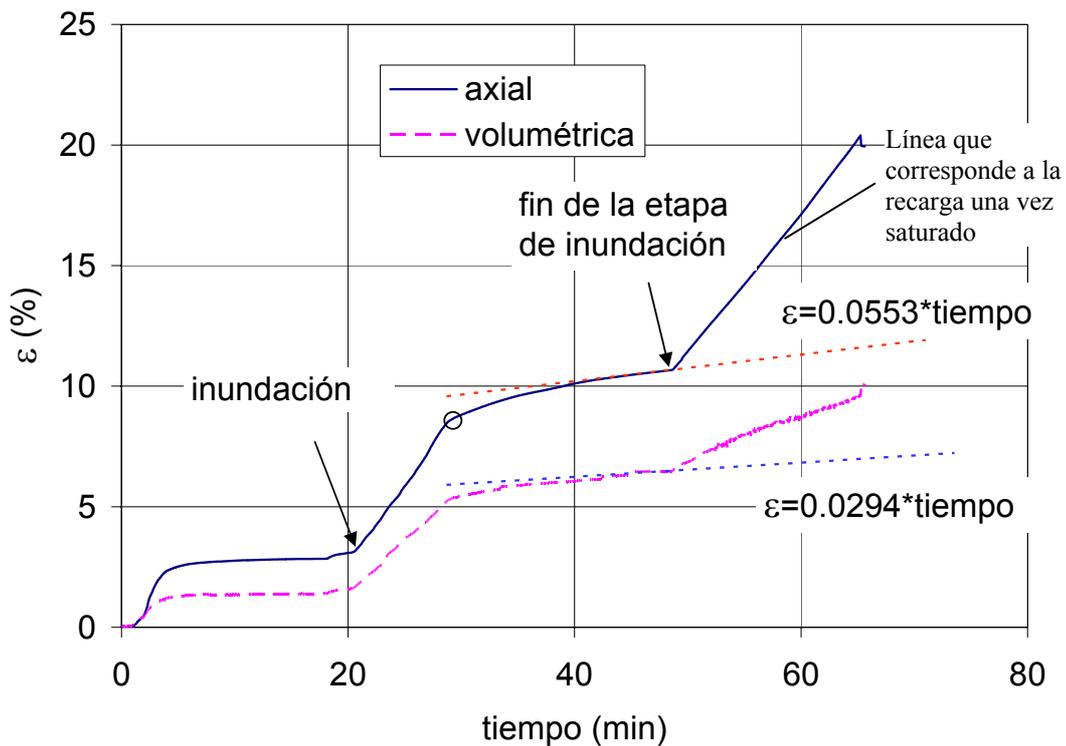


Figura 4.28 Deformación axial en las diferentes etapas del ensayo.

4.7 Ensayos para la determinación de la forma de la superficie de fluencia

En el capítulo 2 se hizo una revisión de la forma de la superficie de fluencia para materiales granulares. Se observó que su forma dependía de la trayectoria previa de tensiones. La mayoría de trabajos se realizaron en arenas, a altas tensiones o en la zona donde se produce rotura de partículas, en la que el comportamiento de las arenas es similar al de las gravas. Con la finalidad de verificar la forma de la superficie de fluencia para el material utilizado, se siguieron las trayectorias mencionadas en la apartado 4.3.2.

El primer ensayo realizado fue el FSV1 en material saturado. Las trayectorias seguidas fueron escalonadas (ver Figura 4.7). La Figura 4.29 muestra la trayectoria seguida. En la grafica de la derecha se muestran los segmentos de superficie de fluencia obtenidos en el plano p - q con las trayectorias escalonadas. La numeración de los segmentos indica la secuencia en la que se fueron generando. Observando los segmentos de la superficie de fluencia se puede ya intuir su forma. Actualmente existen expresiones matemáticas que con la variación de algunos parámetros pueden tomar una amplia variedad de formas (Desai 1980, Lagioia *et al.* 1996, MacDowell 2000). Entre las expresiones consultadas se escogió la propuesta de McDowell (2000), debido a su simplicidad. La expresión puede con la variación de un solo parámetro obtener una amplia gama de formas. La expresión es la siguiente:

$$\eta = N \left[(a + 1) \ln \left(p_0 / p \right) \right]^{1/(a+1)} \quad (4.3)$$

donde $\eta = q/p$;

a = Parámetro que tiene que define la forma de la curva;

p = Tensión media en la trayectoria.

p_0 = Presión de pre-consolidación.

N = Valor de η en el punto más alto de la curva.

Se ajustaron los segmentos de superficie de fluencia a la ecuación (4.3), para obtener las cargas de pre-consolidación de la curva a la que pertenece cada segmento de superficie de fluencia encontrado. El parámetro a que determina la forma de la superficie de fluencia se mantuvo constante. El parámetro N es un parámetro que evoluciona con la superficie de fluencia a medida que crece el desviador; en condiciones de deformación última N es igual a M_{cr} . Como cada uno de los segmentos tiene un N diferente, para hacerlos comparables se normaliza su valor de N para hacerlo igual a 1.9; valor aproximado de M_{cr} del material. Las coordenadas de los segmentos de superficie de fluencia se dividieron entre sus respectivas cargas de pre-consolidación, para obtener una sola curva de fluencia, la mostrada en la Figura 4.30. Se observa que los segmentos se ajustan de una manera satisfactoria a la ecuación propuesta por MacDowell.

Se graficaron además las direcciones los vectores de deformación plástica, en los puntos de fluencia de cada segmento. Las direcciones no son en general perpendiculares a la superficie de fluencia, por lo que se corrobora el comportamiento no asociado del material. Cuando las partículas se rompen generan una redistribución de las deformaciones. En este momento el incremento de deformaciones volumétrico es mayor que el desviador y momentáneamente la dirección del flujo plástico cambia de dirección. Este fenómeno se puede visualizar también en el grafico de la Figura 4.30.

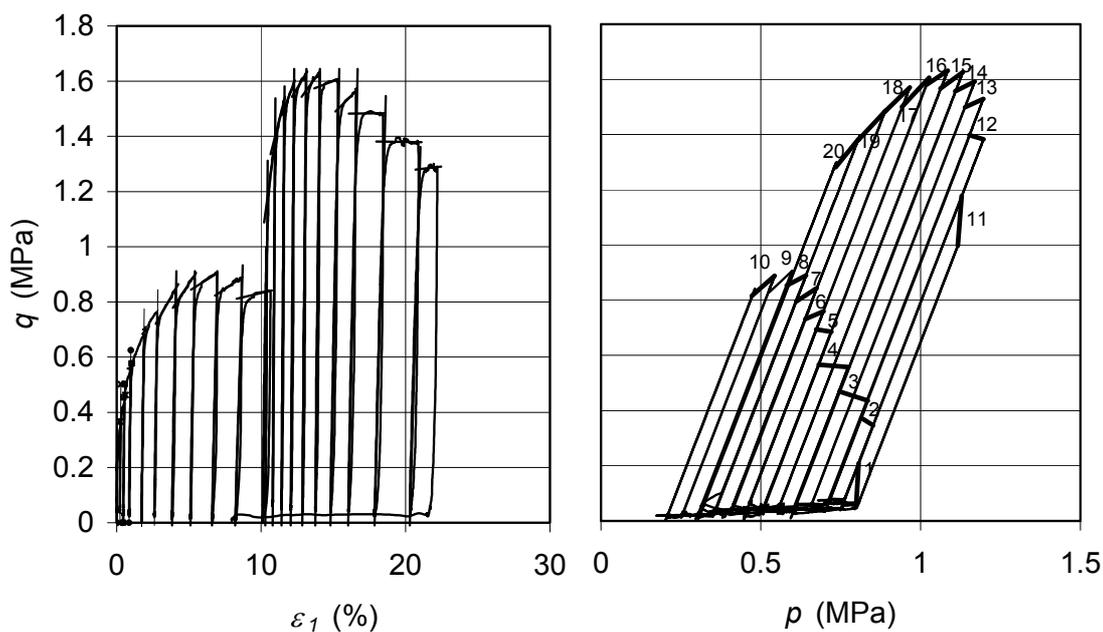


Figura 4.29 Trayectorias escalonadas para la obtención de segmentos de la superficie de fluencia. Ensayo FSV1.

Se realizó un segundo ensayo con el material saturado, el FSV2, tiene una trayectoria más complicada. La trayectoria se diseñó para obtener más información de la parte frontal de la superficie, ya que en el ensayo FSV1 se obtuvieron apenas dos segmentos en esta zona. La Figura 4.31 muestra la trayectoria seguida en el espacio p - q . La numeración de los segmentos de superficie de fluencia indica la secuencia seguida. En este ensayo hay 4 segmentos en la zona frontal de la superficie de fluencia. En general los segmentos de superficie de fluencia se adaptaron a la ecuación (4.3).

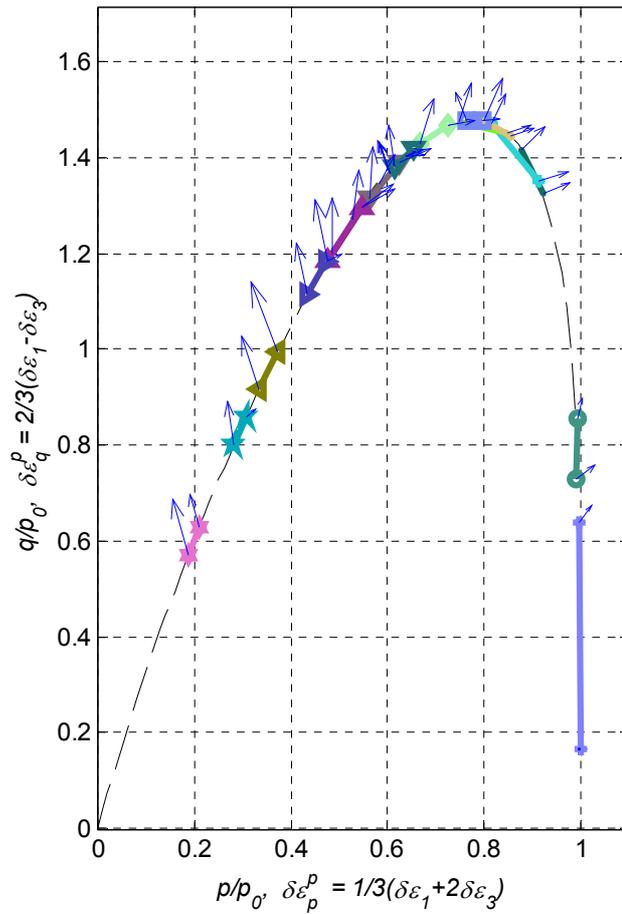


Figura 4.30 Ajuste de los segmentos de superficie de fluencia obtenidos de la Figura 4.29.
Material saturado.

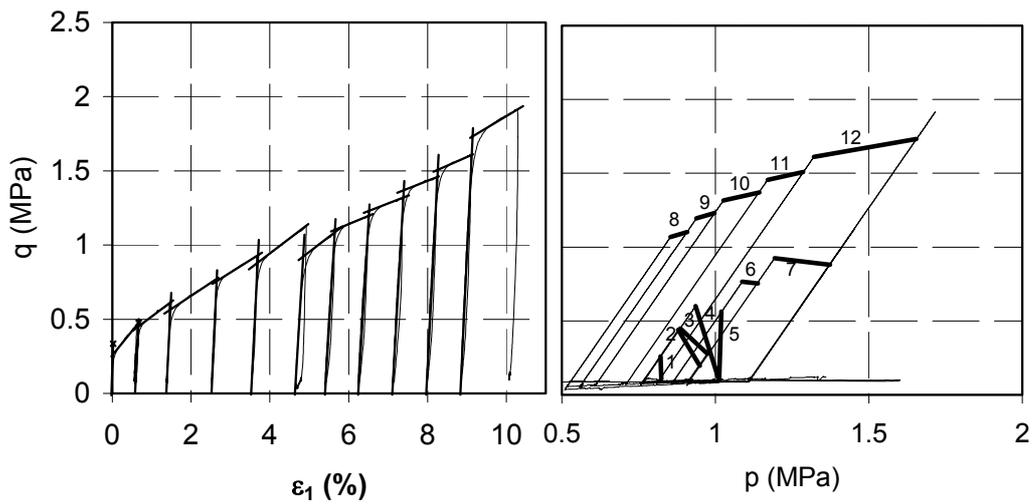


Figura 4.31 Trayectorias escalonadas para la obtención de segmentos de la superficie de fluencia.
Ensayo FSV2.

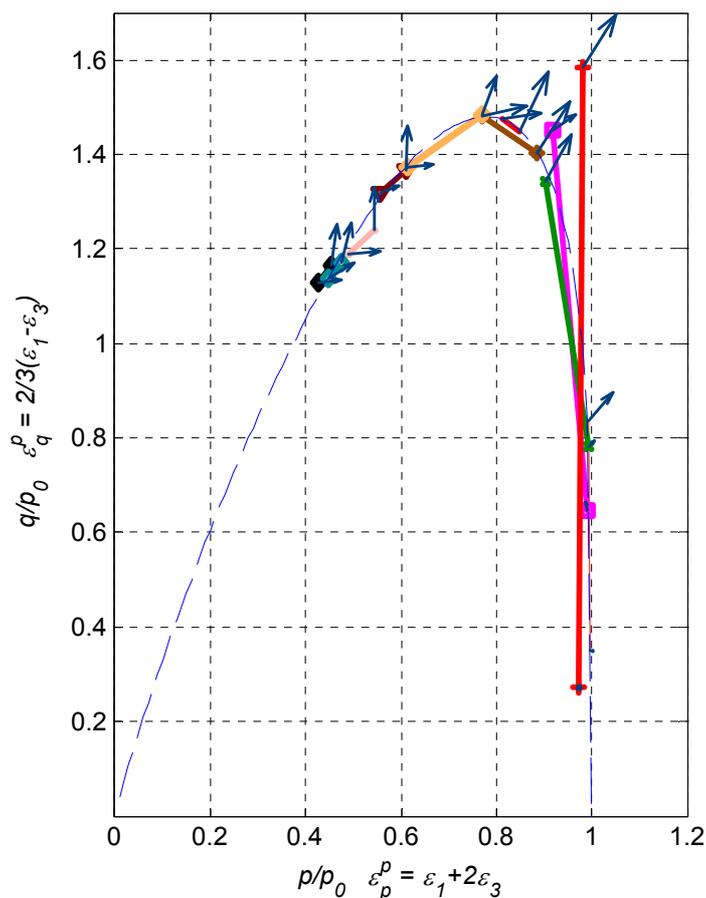


Figura 4.32 Ajuste de los segmentos de superficie de fluencia obtenidos de la Figura 4.31. Material saturado.

Se impusieron un segundo tipo de trayectorias para verificar la forma obtenida con las trayectorias escalonadas en los ensayos previos. Los ensayos FS1, FS2, y FS3 sirvieron para obtener la forma de la superficie de fluencia con material saturado y los ensayos FD1, FD2 y FD3 para obtener la superficie de fluencia del material seco (HR = 42%). Los ensayos se realizaron con control de tensión, cada ensayo duro aproximadamente una hora. En las Figuras 4.33 y 4.34 se muestran las trayectorias p - q , y las curvas tensión deformación de cada ensayo. Los resultados de estos ensayos se resumen en la Figura 4.35, los puntos de fluencia se obtuvieron con deformaciones y trabajo plástico. Se dibujan dos superficies de fluencia con los puntos obtenidos, donde se comprueba la forma general de la superficie de fluencia antes comentada. Se observa claramente que existió una diferencia en las cargas de pre-consolidación obtenidas para la muestra seca y la saturada. El material saturado alcanza primero la fluencia ya que tiene menor resistencia en general, como se ha observado en todos los ensayos previos. En las otras zonas no se aprecia diferencia en el comportamiento.

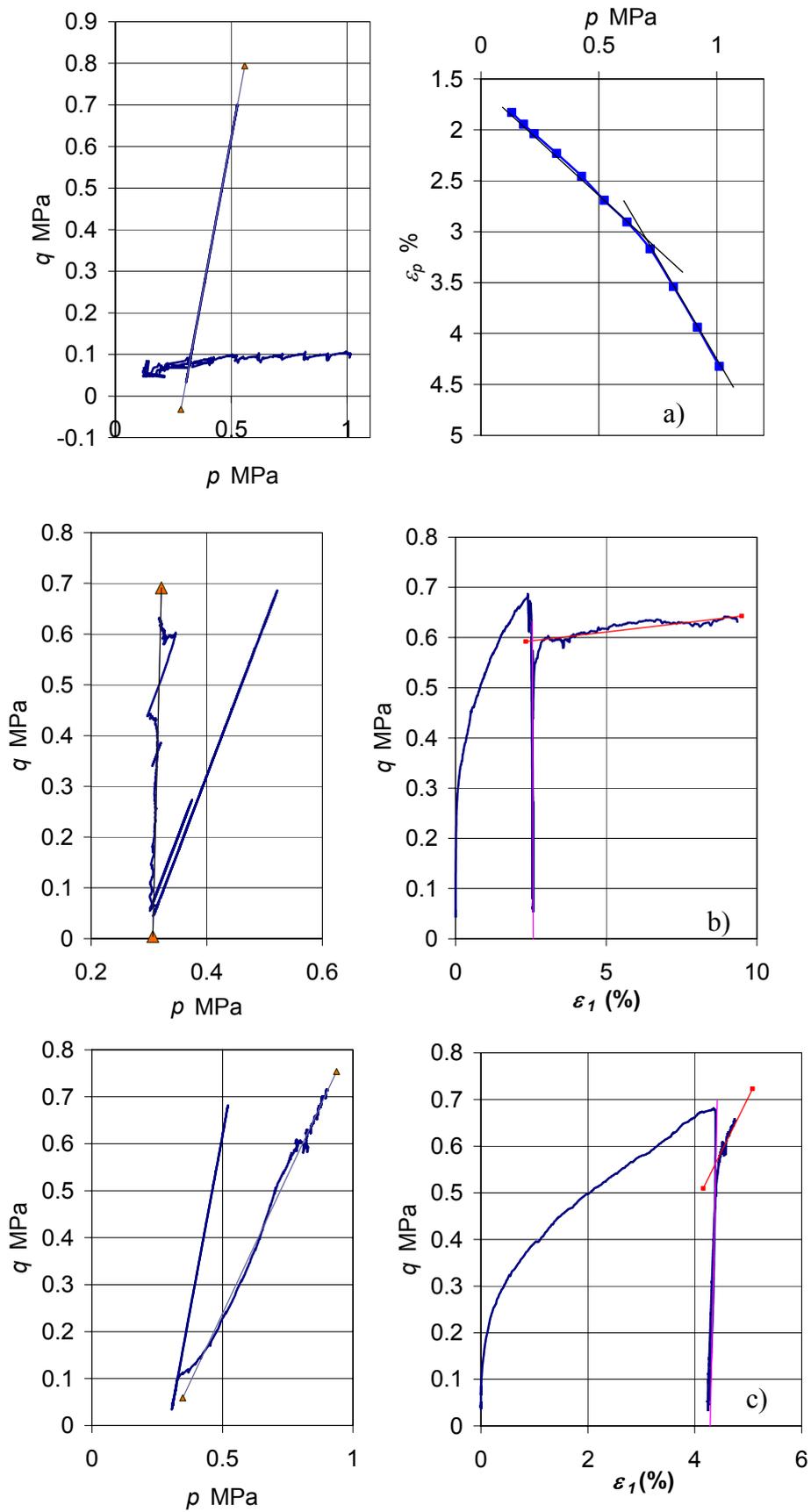


Figura 4.33 Trayectorias p - q y tensión-deformación para obtener la superficie de fluencia en material saturado. a) FS1, b) FS2 y c) FS3.

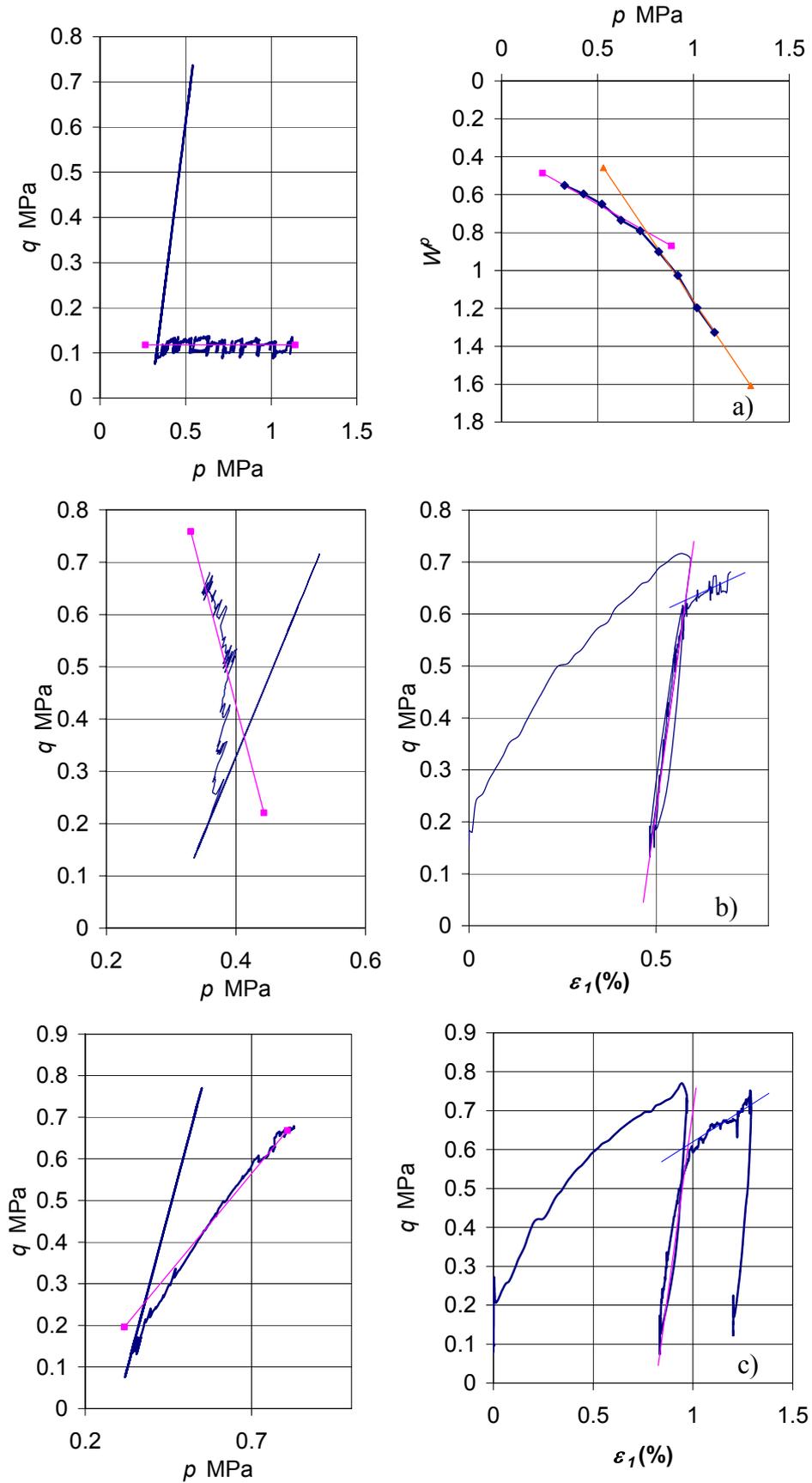


Figura 4.34 Trayectorias p - q y tensión-deformación para obtener la superficie de fluencia en material con HR de 42%. a) FD1, b) FD2 y c) FD3.

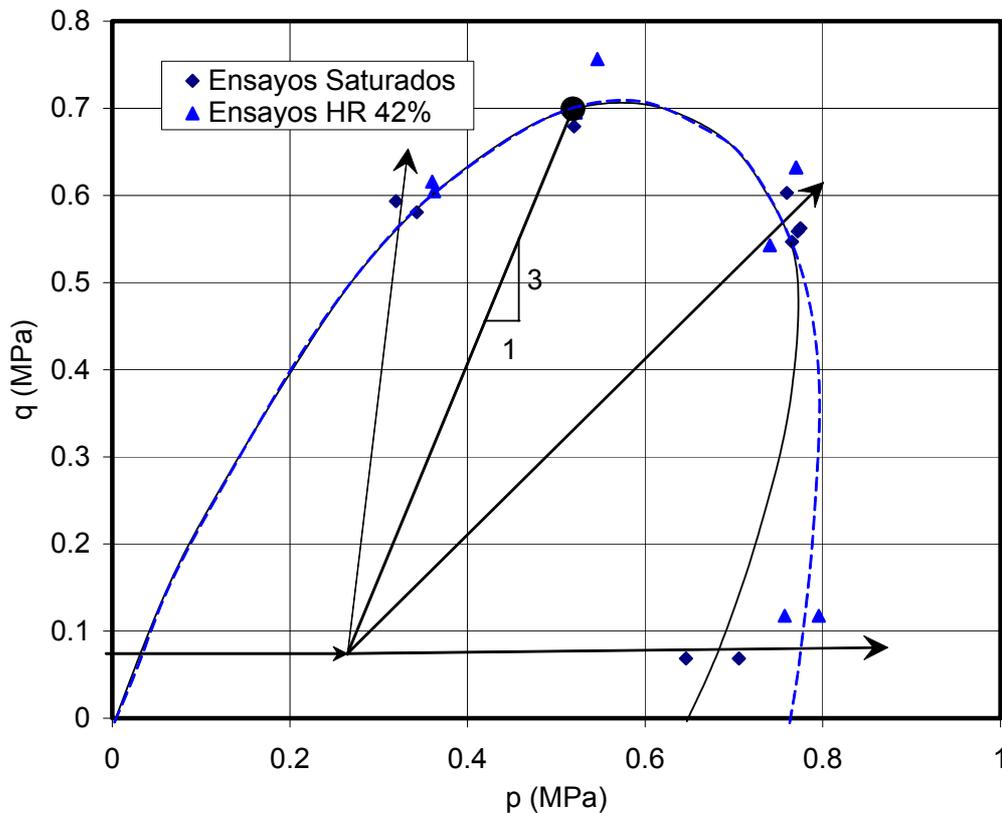


Figura 4.35 Superficie de fluencia para el materia saturado y con HR de 36%.

Las trayectorias de los ensayos FDS, muestran como se contrae la superficie de fluencia cuando pasas de un estado con una HR de 36 a uno con 100%. Los ensayos se realizaron en tensión controlada. La trayectoria de cada ensayo duró aproximadamente 1 hora. Las trayectorias p - q y los gráficos tensión-deformación para cada ensayo se muestran en la Figura 4.36. Se muestran además los puntos de de la superficie de fluencia obtenidos en cada ensayo. Los triángulos corresponden a la superficie de fluencia a una HR 36%, y los círculos a una HR de 100%. Con las líneas que se interceptan en las curvas tensión-deformación se obtiene una de las coordenadas p o q de la superficie de fluencia, según sea el caso. La segunda coordenada se obtiene con una tercera línea en el plano p - q , que tiene la inclinación de la trayectoria seguida para interceptar la superficie de fluencia.

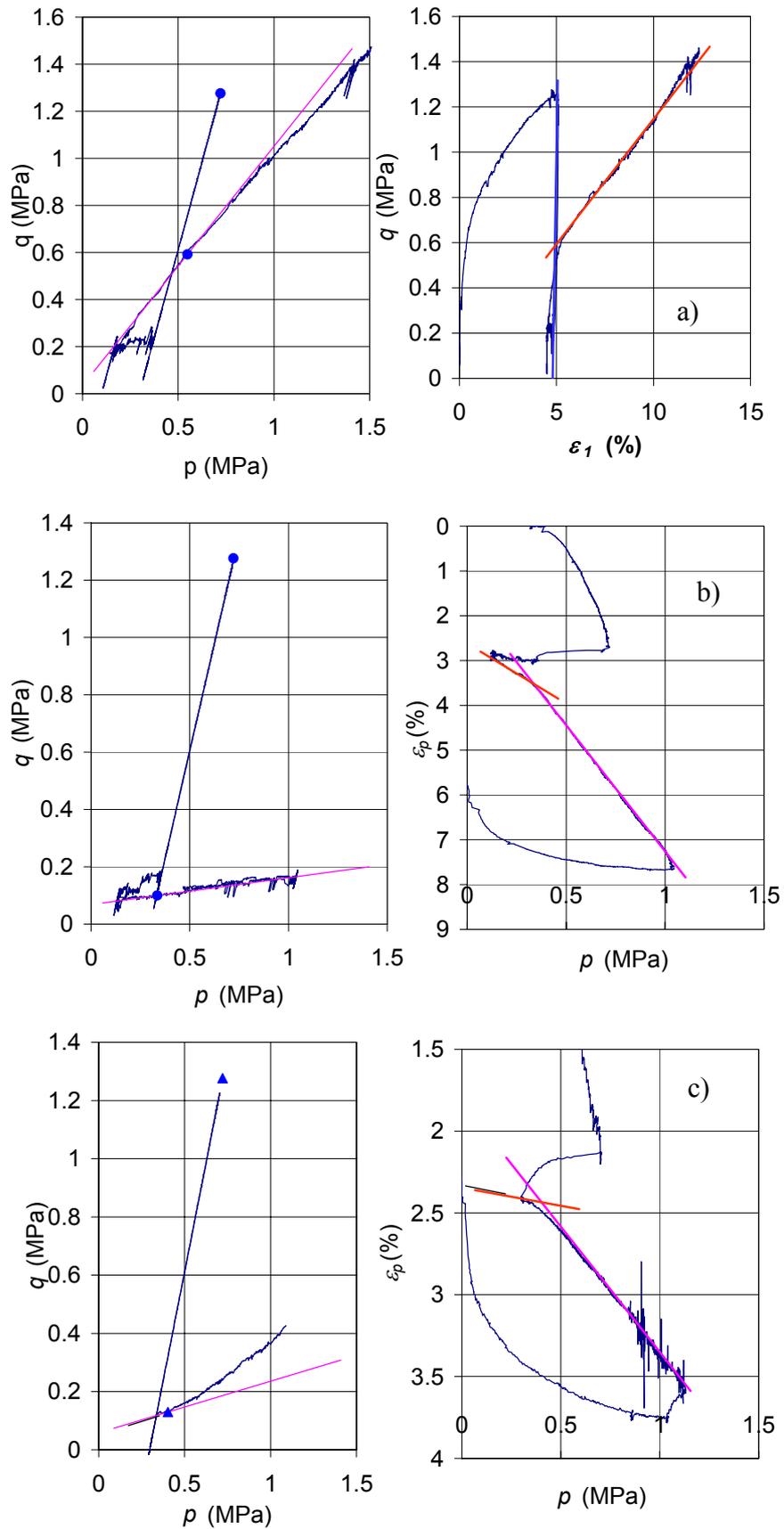


Figura 4.36 Obtención de puntos de fluencia de los ensayos a) FDS1, b) FDS2 y c) FDS3. La simbología de los puntos de fluencia corresponde con la Figura 4.37

En la Figura 4.37 se muestra un resumen de los resultados obtenidos con las tres trayectorias. Se obtienen dos puntos de la superficie de fluencia no-saturada y la saturada contraída. Se traza por estos dos puntos y el origen, la posible superficie de fluencia; con forma similar a la que se obtuvo en los ensayos anteriores. Este ensayo muestra que la superficie de fluencia cambia de tamaño con la HR, es decir, la resistencia al corte está influenciada por la succión.

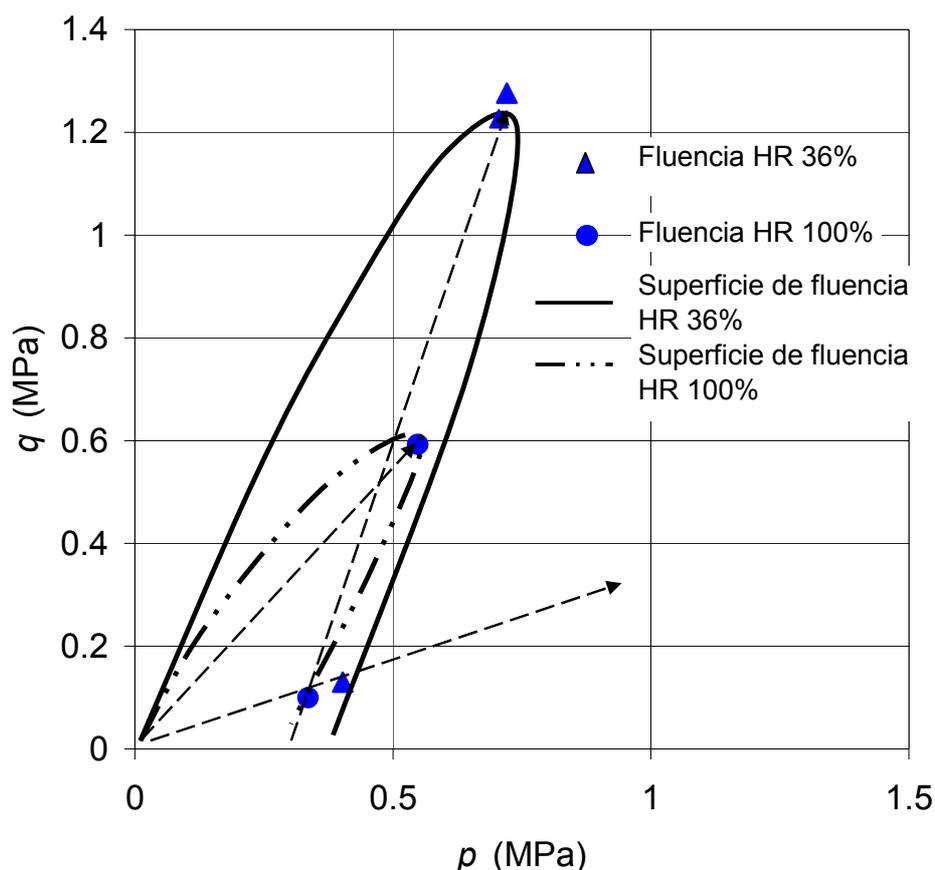


Figura 4.37 Contracción de la superficie de fluencia cuando se pasa de una HR de 36 a 100 %.

4.8 Ensayos de compresión isótropa

Con la idea de complementar la serie de ensayos realizados en el equipo triaxial, se hicieron dos ensayos isótropos. Las dos trayectorias seguidas están diseñadas para obtener los parámetros del modelo de Oldecop y Alonso (2001). Los resultados que se muestran en la Figura 4.38, corresponden a lo esperado en este tipo de ensayos. En el ensayo saturado se presenta una pequeña expansión en el momento de la saturación. En el ensayo con trayectoria de colapso, se presenta el colapso al humedecer, y se llega a una deformación

parecida a la del ensayo saturado. Frente a cargas similares la compresibilidad de ambas muestras es similar.

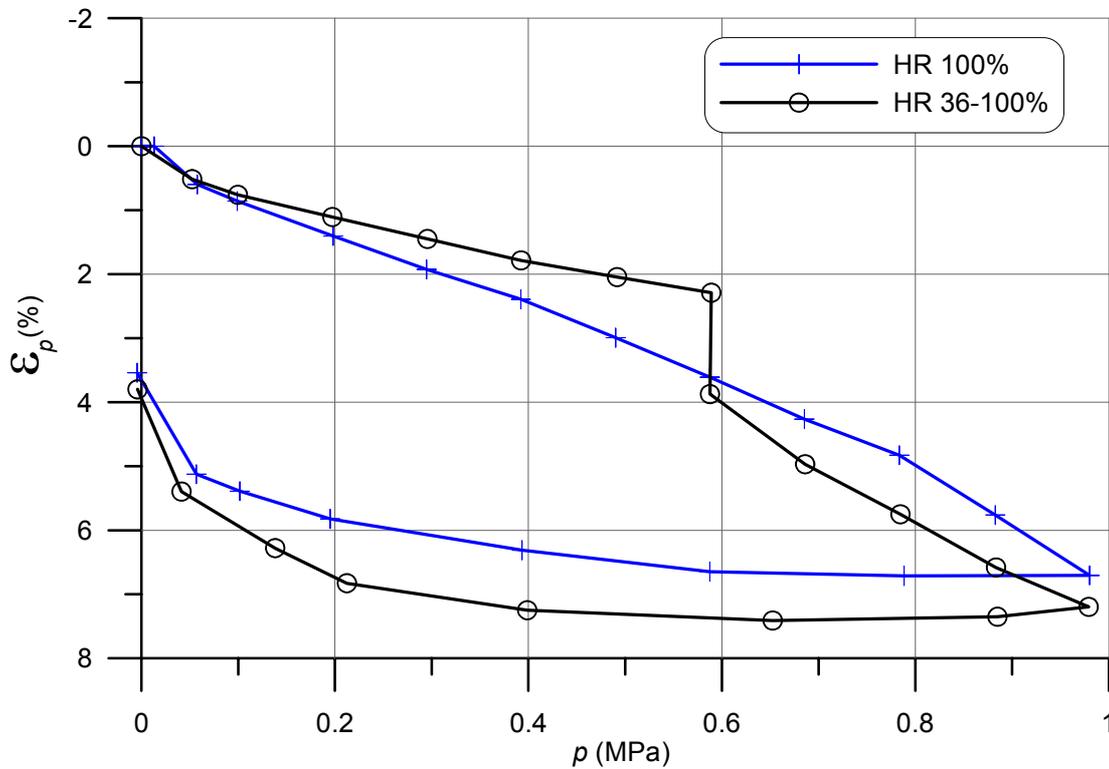


Figura 4.38 Ensayos isótopos hechos en el equipo triaxial.

Las curvas de deformación en función del tiempo del ensayo saturado se encuentran en Figura 4.39. En este caso la carga se dejó estabilizar durante un día, y se presenta sólo los datos hasta un tiempo de 1000 minutos; de acuerdo a la convención utilizada por Oldecop (2000). En este ensayo se utilizó el Material 1. La saturación del material se hizo con el material sometido a una pequeña carga de de 0.05 MPa. En la curva se observa como en los primeros minutos el material tiene un pequeño colapso e inmediatamente después comienza a tener un hinchamiento, con el que alcanza un volumen ligeramente mayor que el inicial. En los siguientes incrementos de carga, se observa una compresión inicial seguida de una estabilización posterior. La estabilización posterior ya no se presenta a partir de de 0.8 MPa; a partir de aquí la deformación temporal empieza a ser significativa. En el último incremento de carga, la pendiente poscarga es la mayor.

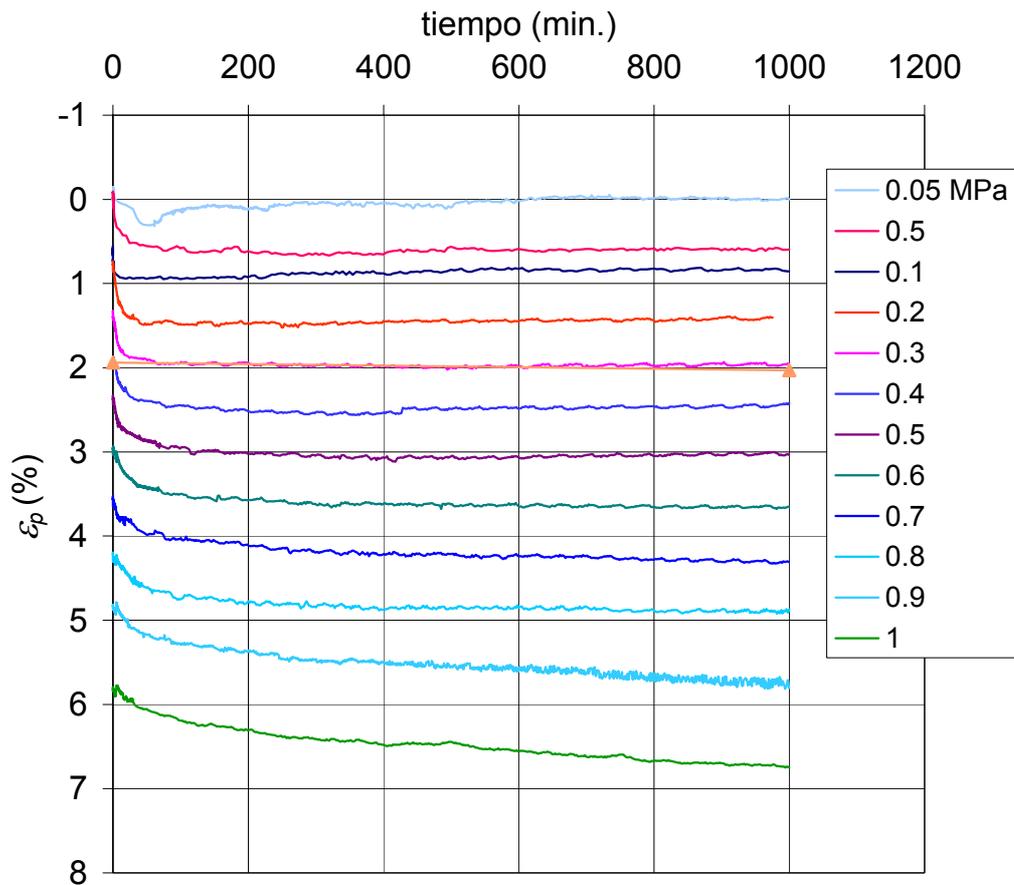


Figura 4.39 Curvas deformación-tiempo, para el ensayo isotrópico saturado. Ensayo IS

En la Figura 4.40 se presentan las curvas deformación-tiempo para el ensayo IC. En este ensayo cada incremento de carga duro aproximadamente 30 minutos; representan datos hasta los 25 minutos. La intención del ensayo era cuantificar la deformación de colapso sufrida por el material. El ensayo se realizó con el Material 2. En el primer incremento de carga el material sufrió un reajuste significativo. Hasta el incremento de 0.6 MPa el material tiene una moderada deformación que después se estabiliza. En la etapa de colapso con saturación se presenta una gran deformación y la pendiente posterior no llega a estabilizarse. En los últimos incrementos tampoco se estabiliza la deformación. Al final se obtiene una deformación volumétrica mayor que el ensayo previo.

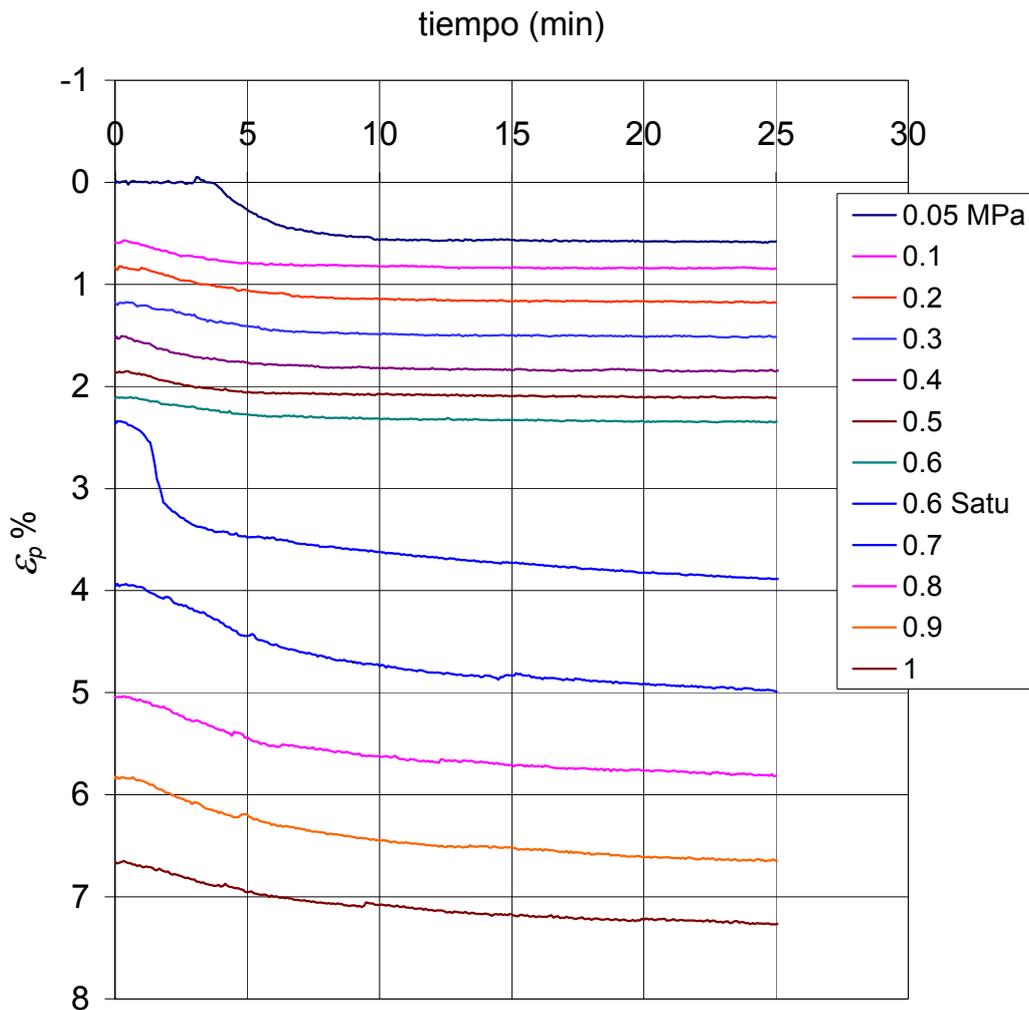


Figura 4.40 Curvas de compresibilidad para el ensayo con trayectoria de colapso. Ensayo IC.

4.9 Deformación local vs. deformación global

La instalación de los LDT se realizó para verificar si las deformaciones axiales medidas en el cabezal no están afectadas por el mal contacto entre el material y el filtro, efecto “bedding”. En la Figura 4.41 se comparan las deformaciones axiales obtenidas con los LVDT y los LDT, para los ensayos realizados con humedad relativa de 92%. En la figura se observa que no existe diferencia inicial apreciable. Si se amplía la escala de la primera parte del ensayo (ver Figura 4.42) se observa que a partir del 2% de deformación vertical, empieza a haber diferencia apreciable. Esta diferencia se observa mejor en las etapas de descarga-recarga. El desfase al comparar los dos resultados es muy claro y es de sentido opuesto al que se presenta cuando existe error por mal contacto entre material y cabezal Baldi *et al.* (1988). El efecto “bedding” disminuye la rigidez del material. La eliminación

de este error es debido a que los vacíos que se provoca por la discontinuidad entre el cabezal y el material, fueron llenados por material de menor tamaño y así asegurar la transmisión de la cargas al material en conjunto y no sólo a unas pocas aristas de las partículas sobresalientes.

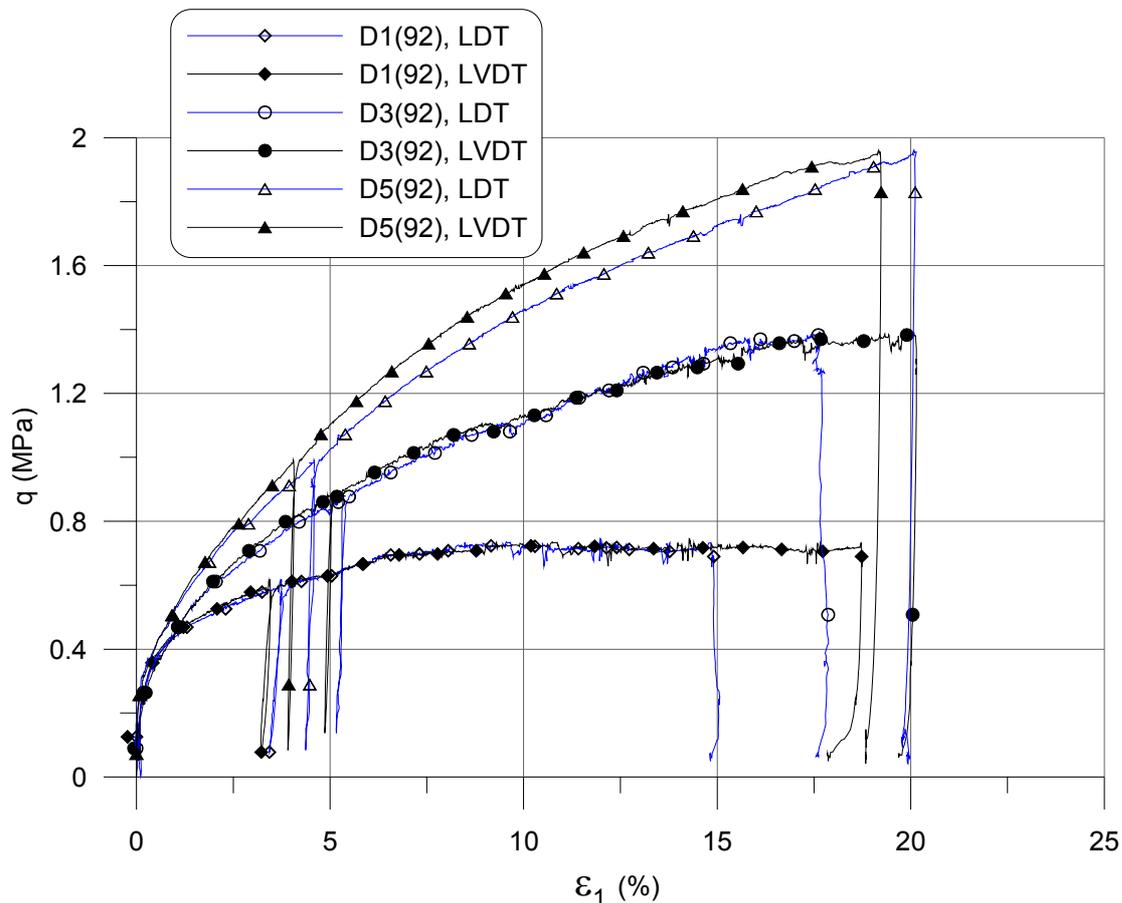


Figura 4.41 Comparación de las deformaciones axiales medidas con los LVDT y LDT. En ensayos D1(92), D3(92) y D5(92).

Analizando la etapa posterior a la descarga-recarga, el desfase entre las curvas que corresponde a los LVDT y los LDT es más notorio; se puede observar mejor en la etapa de descarga al término del ensayo. En el ensayo D5(92) la diferencia entre las deformaciones finales es la más pequeña. En los otros dos ensayos la diferencia se incrementa. Los LVDT detectan mayor deformación que los LDT. Parece que la parte media de la probeta se deforma menos que la probeta completa.

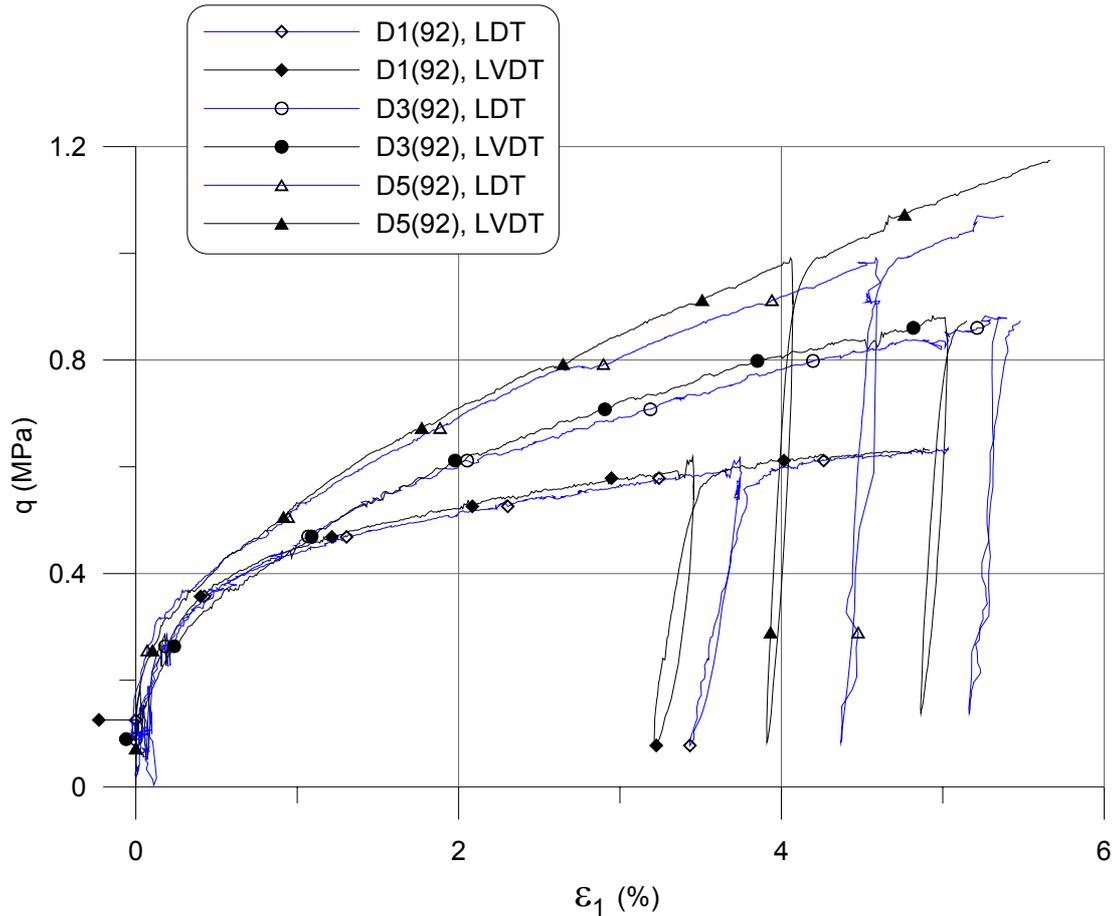


Figura 4.42 Comparación de las deformaciones axiales medidas con el LVDT y los LDT, deformación hasta 5%. En ensayos D1(92), D3(92) y D5(92).

Según estos resultados, la diferencia entre la deformación axial local y la deformación global es más notoria en los ensayos D1(92) y D3(92) en la zona de grandes deformaciones, donde se suele atribuir menos diferencia entre las deformaciones locales y globales. La causa se puede explicar como sigue. A medida que se deforma la probeta la membrana se empieza a contraer produciendo arrugas. Si el empuje vertical de la membrana es mayor que el rozamiento de la membrana con el material, la membrana puede deslizarse y producir errores en los LDT. Por tanto, cuando se utilizan presiones de confinamiento menores disminuye la fricción y se produce mayor error.

Según el análisis anterior la utilización de los LVDT, que miden la deformación vertical tomando como referencia el cabezal, funcionan satisfactoriamente y sus mediciones no se ven afectadas por el efecto “bedding”. Los LDT tienen mejor comportamiento en la zona

de pequeñas deformaciones, ya que grandes deformaciones su medición se ve afectada por el desplazamiento de la membrana respecto al material.

En todos los ensayos siempre se colocó un LVDT, en la plataforma del triaxial, para verificar si existía diferencia entre las deformaciones medidas en el exterior y en el interior del equipo. Además, resultó útil en el caso de que el recorrido de los LVDT interiores se les terminara su recorrido, y dejaran de registrar las variaciones de deformación vertical. La Figura 4.43 muestra los resultados de los ensayos D1(92), D3(92) y D5(92). Se observa claramente que no existe diferencia apreciable entre las deformaciones medidas en el interior y exterior la cámara triaxial. Lo que nos indica que las deformaciones del equipo durante el ensayo son insignificantes respecto a las que se producen en el material.

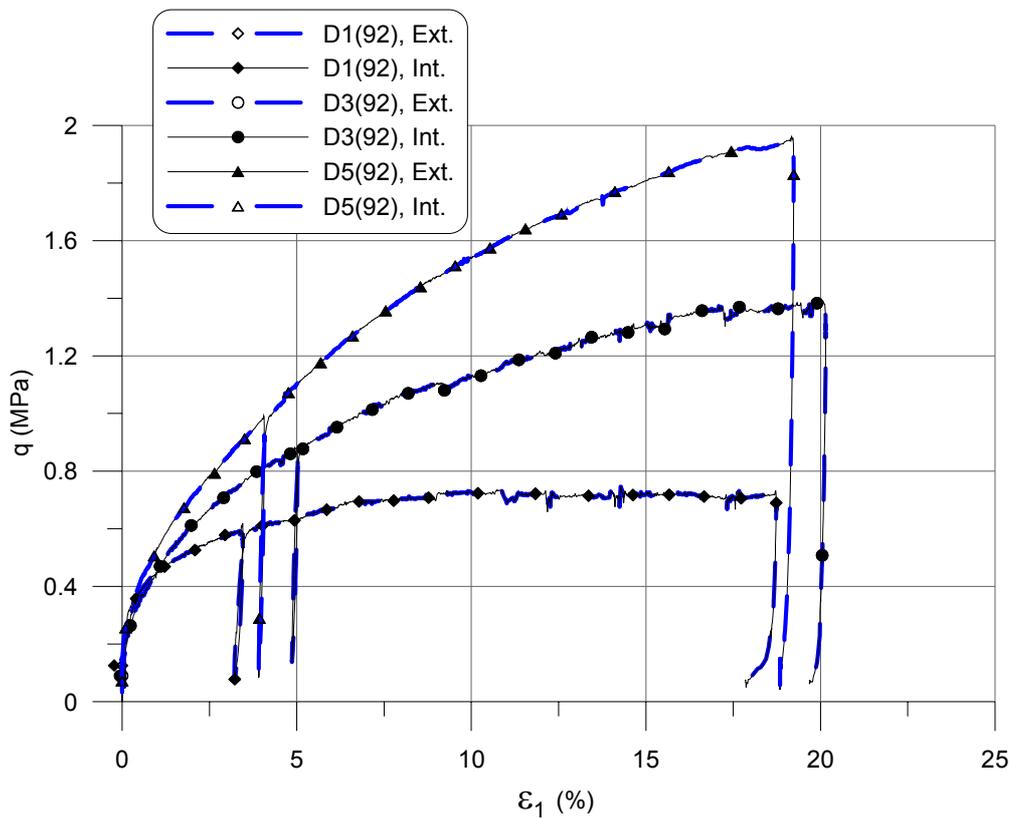


Figura 4.43 Comparación entre deformaciones axiales medidas por LVDT, externos e internos a la célula triaxial. En ensayos D1(92), D3(92) y D5(92).

4.10 Penetración de membrana

Las mediciones de cambio de volumen se hicieron con dos sistemas: con las células de medición diametral (CMD) y con el DPT. La obtención del volumen de manera indirecta con el DPT necesita una corrección por la penetración de membrana. Este factor ha sido tratado por varios autores (Baldi y Nova 1984, Donaghe *et al.* 1988, Nicholson *et al.* 1993), que proponen correcciones basadas en modelos matemáticos o calibraciones experimentales. Las calibraciones experimentales son las más fiables, porque en los modelos matemáticos se hacen ciertas hipótesis de simplificación. La más común consiste en admitir que las partículas son esféricas, suposición muy alejada de la realidad.

Las mediciones obtenidas con las CMD no son afectadas por la penetración de membrana, debido a las características físicas de estos transductores (ver Figura 4.44). Además, como se colocan tres células se obtiene un perfil de la probeta bastante fiable. El volumen de la probeta se calculó en base al perfil de una parábola, y con este el volumen se obtuvo un diámetro equivalente; tal como se mencionó en el apartado 4.4. A partir de la diferencia entre diámetros equivalentes, obtenidos con las CMD y el DPT, en cada instante podemos estimar la penetración de membrana. El ensayo isótropo saturado en el que se aplica una secuencia de cargas isótropas, es particularmente adecuado para el cálculo de la penetración de membrana a diferentes presiones de confinamiento. La penetración de membrana se cuantifica mediante el cambio de volumen provocado por la penetración de membrana respecto a la superficie expuesta a la presión de confinamiento. En la Figura 4.45 se muestra la penetración de membrana en cm^3/cm^2 contra la presión de confinamiento para el ensayo isótropo saturado. La curva inicial indica una gran penetración de la membrana en la primera fase del ensayo, y a partir de 0.3 MPa la curva toma una pendiente constante. La penetración de la etapa inicial corresponde a los primeros reajustes de la membrana, que son grandes debido a los abombamientos en las zonas cercanas al cabezal o a la base; producidos por la abrazadera que sujeta la membrana. Los abombamientos son más pronunciados cuanto más grande es el espesor de la membrana (en este caso, 4 mm).

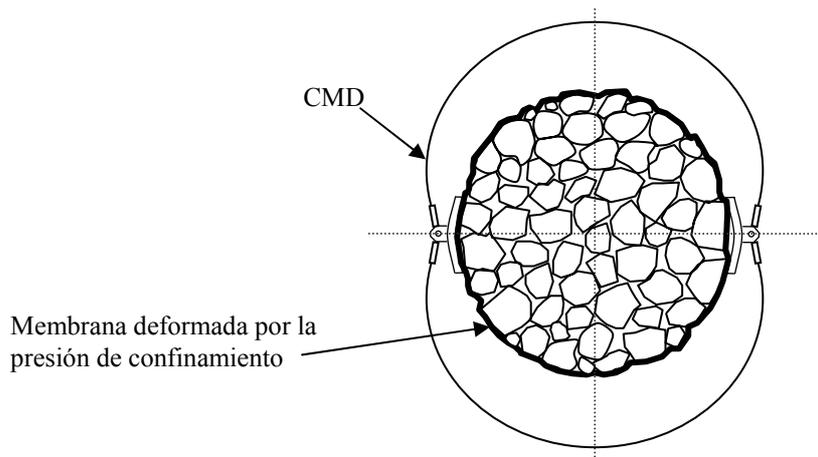


Figura 4.44 Esquema en planta de la probeta y la CMD. Visualización de la influencia de la penetración de membrana en la CMD.

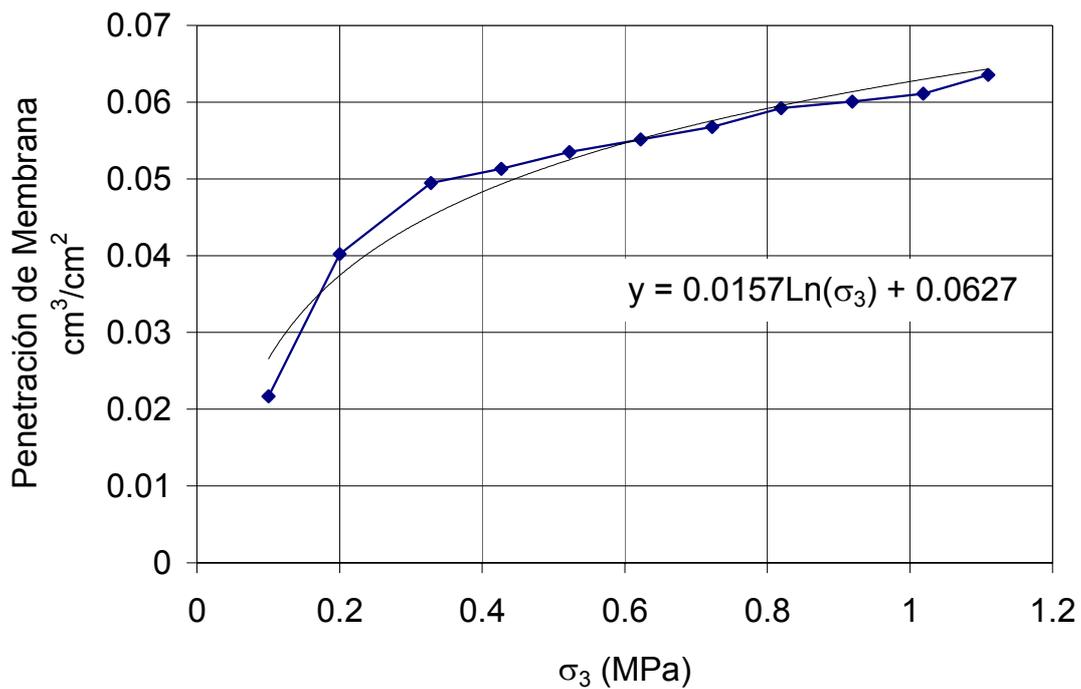


Figura 4.45 Penetración de membrana obtenida del ensayo isótropo saturado.

La penetración de membrana durante la aplicación del desviador, es un tema más complicado de tratar y difícil de eliminar. Siguiendo un procedimiento similar al mencionado anteriormente para el ensayo isótropo, se calculó la penetración de membrana en función de la deformación desviadora ε_q ; a partir de la aplicación de la carga

desviadora. Los resultados de la penetración en los ensayos con HR de 92%, se muestran en la Figura 4.46. Se observa claramente que a medida que cambia la deformación de corte, la penetración aumenta, y de una manera no lineal. Cuando aumenta la presión de confinamiento se presenta mayor penetración de membrana. Lo mismo se obtiene en los ensayos con HR 36% y 100% mostrados en las figuras 4.45 y 4.46. La no linealidad se atribuye al reacomodo del material cuando se somete al corte.

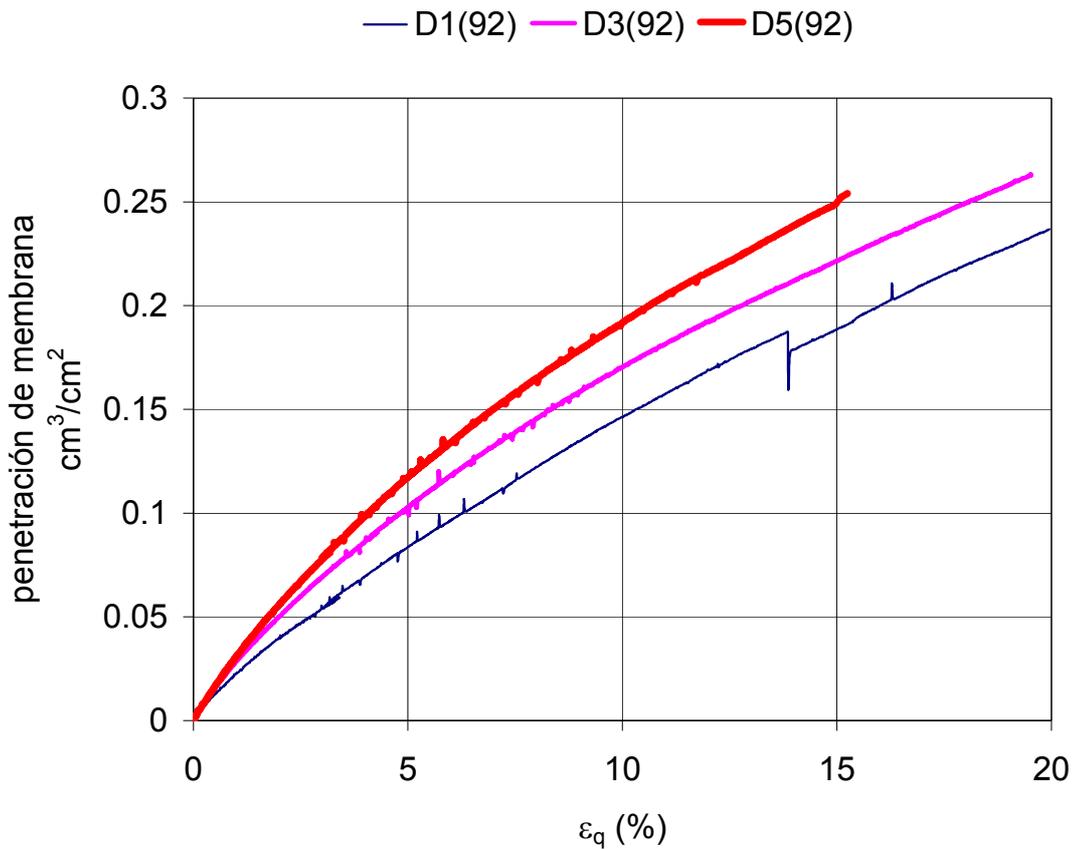


Figura 4.46 Penetración de membrana durante los ensayos triaxiales con HR 92%.

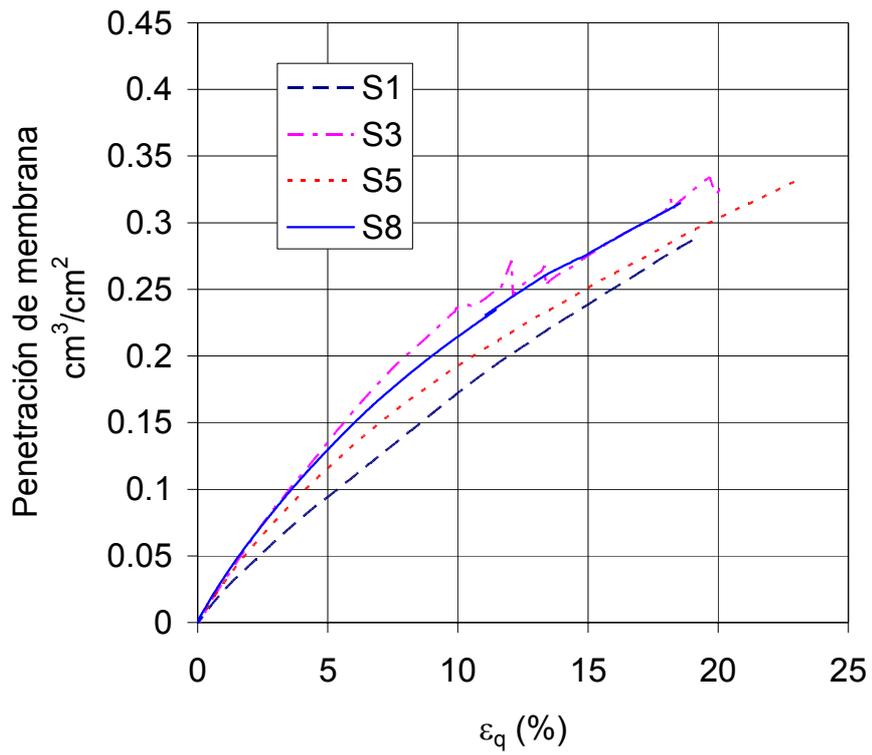


Figura 4.47 Penetración de membrana en los ensayos triaxiales HR 100%.

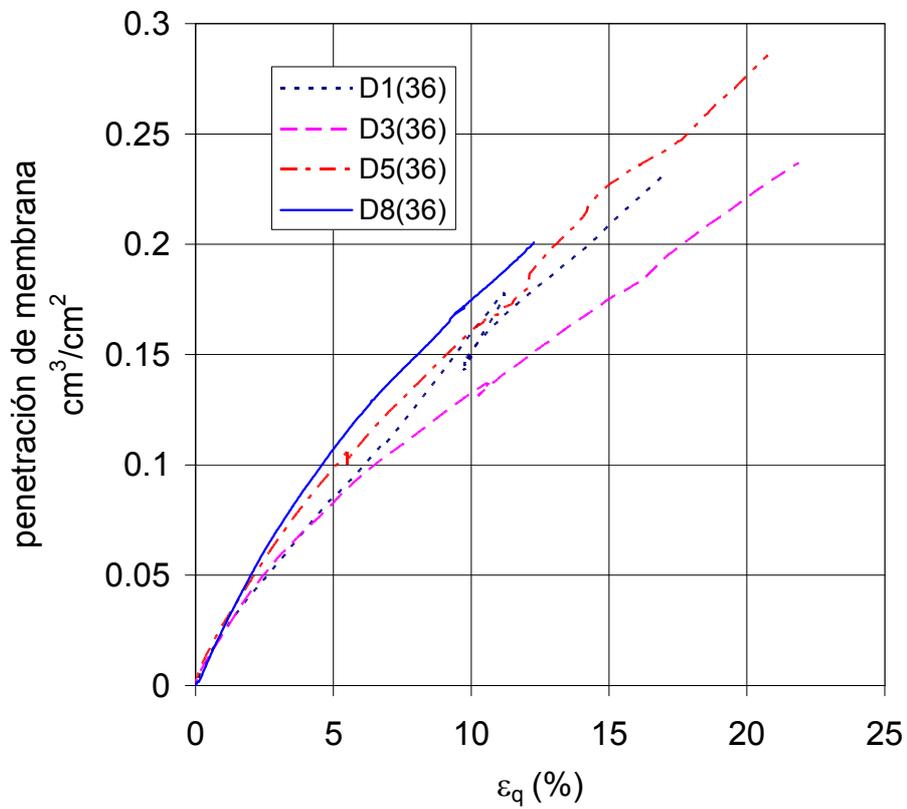


Figura 4.48 Penetración de membrana en los ensayos triaxiales HR 36%.

4.11 Resumen del capítulo

En el presente capítulo se exponen los resultados de los ensayos realizados con el triaxial de escolleras con control de succión, diseñado para este propósito. Las principales conclusiones a que nos conducen estos resultados son:

- La resistencia al corte de la pizarra ensayada aumenta a medida que la succión aumenta.
- La dilatancia volumétrica del material aumenta con la succión.
- La rotura de partículas depende de la presión de confinamiento y la succión.
- La línea de estados críticos para la pizarra está afectada por la succión. La pendiente de la línea no varía con la succión, lo que produce líneas paralelas.
- Las deformaciones en el tiempo de las escolleras debidas a la progresiva fracturación de partículas, un fenómeno asociado a la propagación de fisuras, se ven incrementadas de una manera muy notoria con la aplicación de una carga desviadora (Figura 4.26).
- En ensayos de corte en materiales no saturados, los estados finales después de la inundación, a carga vertical constante, corresponden con las relaciones tensión-deformación obtenidas para el material saturado.
- La superficie de fluencia de la pizarra depende de la trayectoria seguida, y en general tiene formas elípticas, con sus ejes mayores definido por la carga desviadora aplicada.
- La superficie de fluencia posicionada en un estado de tensiones no-saturado, se contrae cuando se satura el material. La carga de pre-consolidación del material seco es mayor que la del saturado.
- Los resultados de los ensayos isótropos presentan las mismas características de comportamiento que los ensayos edométricos.
- El relleno de los vacíos existentes, con partículas pequeñas en la discontinuidad formada por el filtro y el material, elimina el error por el efecto “bedding”.
- La obtención del volumen con las CMD es más confiable que con el DPT, porque esta libre de los errores de penetración de membrana, que son difíciles de estimar a lo largo de un ensayo triaxial, debido a su no linealidad.

