



Departamento de Ingeniería del Terreno,
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO HIDROMECAÁNICO DE
UNA ARCILLA COMPACTADA.

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Carlos Manuel Buenfil Berzunza

Directores de tesis:
Antonio Lloret Morancho
Antonio Gens Solé

Barcelona, Septiembre de 2007

5. PROGRAMA Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.

5.1 Introducción.

El programa de ensayos fue diseñado con base a los objetivos perseguidos en ésta tesis. El objetivo fundamental planteado para la realización de estos ensayos ha sido reproducir el comportamiento hidromecánico del suelo no saturado, con estructura abierta, considerando los cambios en la succión matricial y la historia de tensiones experimentada por el suelo durante la compactación. Con éste fin el comportamiento hidromecánico de un suelo compactado, producido con estructura abierta, fue caracterizado mediante la realización de ensayos triaxiales, siguiendo diferentes trayectorias tensiones. Asimismo, se trata de obtener pautas de comportamiento útiles para validar hipótesis empleadas en el modelo conceptual constitutivo.

El programa consistió en una serie de ensayos triaxiales realizados con el espécimen en estado saturado y no saturado, que caracterizan diversos aspectos del comportamiento hidromecánico del suelo compactado, con el propósito de extender el conocimiento sobre los efectos de la historia de tensiones experimentada por el suelo durante la compactación. Un objetivo específico del programa de ensayos fue evaluar el efecto de la succión matricial y de la trayectoria de tensiones sobre el comportamiento hidromecánico del suelo en estudio, incluyendo el comportamiento de la relación entre las deformaciones volumétricas y las de corte. El objetivo específico del programa de ensayos saturados fue la determinación de la forma de la superficie de fluencia de éste material saturado, así como evaluar su comportamiento mecánico después de producirse deformaciones generadas durante su saturación (trayectoria de mojado). También, se evalúan los parámetros intrínsecos de resistencia de las muestras en condiciones saturadas y parcialmente saturadas.

En la parte inicial de éste capítulo, apartado 5.2, se presenta una descripción de las trayectorias completas realizadas en los ensayos sobre muestras no saturadas, sin entrar en detalle sobre los procedimientos experimentales seguidos. Los ensayos constan de varias etapas, descritos en la Tabla 5.2, que fueron agrupadas con base a los objetivos de la tesis para realizar una mejor descripción de los procedimientos y los resultados de los ensayos. En el apartado 5.3, se presenta, por etapas de los ensayos no saturados, la descripción de los procedimientos experimentales. Las

etapas consideradas son: etapas de compresión isótropa, con incrementos cuasi-continuos de tensiones, bajo condiciones de succión matricial constante; etapa de compresión anisótropa, con incrementos cuasi-continuos de tensiones, con condiciones de succión matricial constante; etapas de reducción cuasi-continua de succión matricial bajo condiciones de relaciones de tensión, $q/p-u_a$, constante; etapa de compresión triaxial drenada bajo succión constante, en diferentes valores succión matricial. En todos los ensayos se realiza inicialmente una etapa de equilibrio, con el fin de alcanzar la succión matricial de inicio de prueba (de acuerdo a la trayectoria de tensión establecida).

Los ensayos con el espécimen en estado no saturado se realizaron en el equipo triaxial con succión controlada desarrollado en la UPC (descrito con detalle en el apartado 3.3), mientras que el espécimen en condiciones saturadas se ensayó en la célula triaxial convencional con controladores GDS instrument Ltd (descrito en detalle en el apartado 3.4.3). El estado de tensiones del suelo parcialmente saturado quedará determinado mediante tres variables independientes: la tensión media neta, $p-u_a=(\sigma_a+2\sigma_r)/3-u_a$, la tensión de corte, $q=\sigma_a-\sigma_r$, y la succión matricial $s=u_a-u_w$, donde σ_a y σ_r son las tensiones principales axial total y radial total respectivamente. En el caso de ensayos triaxiales saturados la succión matricial es igual a cero, y el estado de tensiones quedará determinado mediante la tensión media efectiva, $p'=p-u_w=(\sigma_a+2\sigma_r)/3-u_w$, y la tensión de corte, $q=\sigma_a-\sigma_r$.

En la realización de estos ensayos se usó una arcilla de baja plasticidad (CL) de la ciudad de Barcelona. En el capítulo 4 se describe con detalle la caracterización de este suelo. Éste material ha sido utilizado en otros trabajos de investigación (Gens et al., 1995; Suriol et al., 1998; Barrera, 2002). Los especímenes, de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura, fueron preparados mediante compactación estática en tres capas, a la misma densidad y humedad, tal como se describe con detalle en el capítulo 4. En la Tabla 5.1 se presenta un listado de las condiciones del espécimen después de la compactación: peso específico seco (γ_d), índice de poros (e), contenido gravimétrico de agua (w), grado de saturación (S_r), tensión vertical neta (σ_v-u_a) y tensión media neta ($p-u_a$). En ésta tabla, la tensión media neta ($p-u_a$) ha sido estimada con base a la tensión vertical neta, (σ_v-u_a), y usando un coeficiente de empuje al reposo $K_0=0.48$. Éste valor de K_0 fue obtenido en el ensayo de compactación estática realizada en un edómetro con medida de tensión

lateral, descrito en detalle en el apartado 3.4.2. Se midió una succión de 270 kPa sobre el espécimen compactado, usando un tensiómetro de alto rango (empleado por Ridley y Burland, 1993).

Tabla 5.1 Propiedades después de la compactación de muestras usadas en los ensayos triaxiales.

γ_d kN/m ³	e	w %	S_r %	$\sigma_v - u_a$ kPa	$p - u_a^*$ kPa	$s = u_a - u_w$ kPa
14.9	0.82	12	40	270	180	270

* obtenido con K_0 igual a 0.48

5.2 Programa y trayectorias de los ensayos triaxiales no saturados.

Para caracterizar el comportamiento del suelo en estado no saturado (succión matricial, s , diferente a cero) se realizaron diferentes trayectorias de tensión en el equipo triaxial, mediante el control de la succión matricial, y de las tensiones media neta ($p - u_a$) y de corte (q). Las trayectorias de tensiones seguidas se resumen en la Tabla 5.2. Los ensayos realizados se han agrupado en 4 tipos distintos con base a las trayectorias de tensiones seguidas:

- Serie I .Ensayos de compresión isotropa y una posterior compresión triaxial, bajo condiciones de succión matricial constante (véase la Tabla 5.2 y la Figura 5.1).
- Serie IW y AW. Ensayos de compresión isotropa y anisótropa bajo una succión matricial constante de 100 kPa, con una posterior etapa de reducción cuasi-continua de succión matricial bajo condiciones de relaciones de tensión $q/(p - u_a)$ constante, finalizando con una compresión triaxial bajo condiciones succión matricial constante (véase la Tabla 5.2, la Figura 5.2 y la Figura 5.3).
- Ensayo A1. Ensayo de carga y descarga anisótropa, seguida de una recarga isotropa, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa, y finalizando con una compresión triaxial bajo la misma succión constante (véase la Tabla 5.2 y la Figura 5.4). Para caracterizar el comportamiento anisótropo del suelo (a una succión determinada) durante la etapa de compresión, éste ensayo se compara con los ensayos de la serie IW y AW en succión matricial constante de 100 kPa.
- Ensayo IWD. Ensayo de compresión isotropa y una posterior compresión triaxial, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa, después de un ciclo de humedecimiento y secado a presión neta media constante (véase la Tabla 5.2 y la Figura 5.5).

Tabla 5.2 Resumen de ensayos no saturados.

Identificación del ensayo	Etapas del ensayo	Descripción ($s=u_a-u_w$, s_0 =succión inicial) $\eta=q/(p-u_a)$	Duración (días)
I1	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=600$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	3.0
	B: compresión isótropa	$p-u_a$: 23–600 kPa en $s=600$ kPa; $q=10$ kPa	14.4
	C: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=600$ kPa en $s=600$ kPa	19.2
I2	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=100$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	1.0
	B: compresión isótropa	$p-u_a$: 23–200 kPa en $s=100$ kPa; $q=10$ kPa	6.0
	C: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=200$ kPa en $s=100$ kPa	8.2
I3	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=10$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	10.5
	B: compresión isótropa	$p-u_a$: 23–150 kPa en $s=10$ kPa; $q=10$ kPa	14.0
	C: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=150$ kPa en $s=10$ kPa	6.0
A1	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=100$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	2.7
	B: compresión anisótropa	$p-u_a$: 14 –200 kPa en $s=100$ kPa; $\eta=0.38$	5.1
	C: descarga anisótropa	$p-u_a$: 200 – 115 kPa en $s=100$ kPa; $\eta=0.75$	1.0
	D: recarga isótropa	$p-u_a$: 115–400 kPa en $s=100$ kPa $q=10$ kPa	6.1
	E: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=400$ kPa en $s=100$ kPa	9.7
AW	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=100$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	3.2
	B: compresión anisótropa	$p-u_a$: 10–200 kPa en $s=100$ kPa; $\eta=0.75$	5.2
	C: reducción cuasi-continua de succión matricial bajo condiciones de relaciones de tensión q/p constante	s : 100 -0 kPa en $p-u_a=200$; $\eta=cte=0.75$; (traslación de ejes desde $s=100$ kPa a 10 kPa y columna negativa de agua de 10 a 0 kPa)	43.0
D: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=150$ kPa en $s=0$ kPa	6.0	
IW	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=100$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	3.0
	B: compresión isótropa	$p-u_a$: 23 – 200 kPa; $s=100$ kPa; $q=10$ kPa	7.0
	C: reducción cuasi-continua de succión matricial bajo condiciones de relaciones de tensión q/p constante	s : 100 -1 kPa en $p-u_a=200$; $q=10$ kPa; (traslación de ejes desde $s=100$ kPa a 10 kPa y columna negativa de agua de 10 a 1 kPa)	39.7
D: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=200$ kPa, $s=cte=0$ kPa	8.0	
IWD	A: equilibrio de succión	s_0 a $s=200$ kPa; en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	1.8
	B: humedecimiento	humedecimiento en etapas: $s=200, 80, 10, 0$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	9.1
	C: secado	secado en etapas: $s=0, 100$ kPa en $p-u_a=23$ kPa; $q=10$ kPa	14.9
	D: compresión isótropa	$p-u_a$: 23–200 kPa en $s=100$ kPa; $q=10$ kPa	5.9
	E: compresión triaxial drenada	$\sigma_r=cte=200$ kPa en $s=100$ kPa	9.6

Simbología de las trayectorias:

I	Muestras consolidadas bajo tensión isótropa.
A	Muestras consolidadas bajo tensión anisótropa.
S	Ensayos con el suelo saturado realizados en equipos convencionales.
W	Humedecimiento del suelo bajo condiciones de $s=u_a-u_w$ controlada.
WD	Trayectoria de humedecimiento y secado del suelo por etapas.

Al realizar estas series de ensayos será posible establecer las siguientes comparaciones entre trayectorias:

- Efecto de la succión matricial sobre el comportamiento hidromecánico del suelo ante la aplicación de tensiones isotropas (serie I)
- Características del comportamiento hidromecánico del suelo ante compresiones isotropas y anisotropas, bajo succión matricial constante (series I y A)
- Efecto de la relación de tensión, $q/(p-u_a)$, sobre el colapso del suelo inducido por la reducción de la succión matricial, a tensión media neta constante, (ensayos IW y AW)
- Efecto de la succión matricial sobre el comportamiento hidromecánico del suelo ante la compresión triaxial en (series I, A, W y WD)
- Efecto de la tensión media neta sobre el comportamiento hidromecánico con la aplicación de compresión triaxial a una misma succión matricial (series I y A).
- Efecto del cambio de succión matricial, durante la etapa de equilibrio, sobre el comportamiento hidromecánico del suelo (en todos los ensayos).

5.2.1 Trayectoria de tensiones seguidas en los ensayos triaxiales no saturados.

En los ensayos I1, I2, I3 la etapa de compresión triaxial con control de succión se realiza después de una etapa de compresión isotropa. La trayectoria completa se muestra en la Figura 5.1. Las etapas de equilibrio, para alcanzar la succión deseada, son mostradas en los tramos A1-B1, A2-B2 y A3-B3 para los I1, I2 e I3 respectivamente. La consolidación isotropa corresponde a los tramos B1-C1, B2-C2 y B3-C3 y la etapa de compresión triaxial bajo succión matricial constante a los tramos C1-D1, C2-D2 y C3-D3. Las trayectorias isotropas se efectuaron incrementando la tensión media neta a una velocidad prefijada, hasta alcanzar estados vírgenes de tensión, bajo tres diferentes succiones matriciales: 600 kPa en el ensayo I1; 100 kPa en los ensayos I2 y 10 kPa en el ensayo I3. La compresión triaxial con control de tensión es llevada a cabo bajo las mismas succiones y una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 600 kPa, 200 kPa y 150 kPa, que corresponden a las condiciones finales de la consolidación isotropa, en los ensayos I1, I2 e I3 respectivamente.

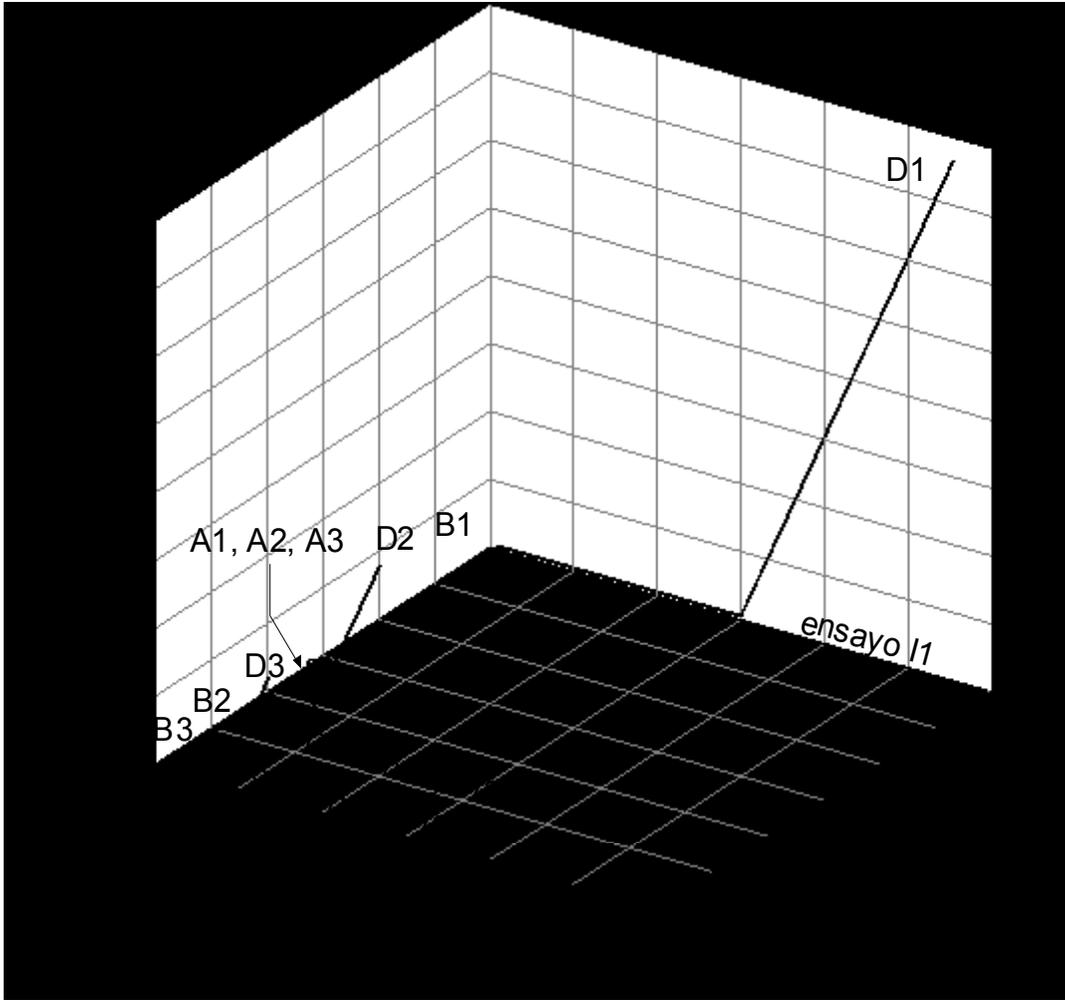


Figura 5.1 Trayectoria de tensiones de los ensayos I1, I2 e I3 (serie I) de consolidación isotrópica y compresión triaxial a tensión controlada, bajo succión matricial constante ($s=600, 100$ y 10 kPa respectivamente).

La trayectoria completa de los ensayos IW y AW se muestra en la Figura 5.2 y la Figura 5.3. En estos casos la etapa de compresión triaxial con control de succión se realiza después de una etapa de mojado. El ensayo IW se divide, principalmente, en tres etapas: consolidación isotrópica continua bajo succión matricial; una posterior etapa de mojado con presión media neta y tensión de corte constantes; y finalmente la etapa de compresión triaxial con control de tensión bajo succión matricial y tensión radial constantes. La consolidación isotrópica (tramo B-C de la Figura 5.2) se realiza, bajo una succión matricial de 100 kPa y una tensión de corte de 10 kPa, hasta alcanzar una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa. La etapa de mojado (tramo C-D de la Figura 5.2) desde una succión matricial de 100 kPa hasta 0 kPa, se realiza bajo una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa y una tensión de corte de (q) de 10 kPa. Por consiguiente, la compresión

triaxial (tramo D-E de la Figura 5.2 se ejecuta bajo una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 200 kPa y una succión matricial de 0 kPa,. La etapa de equilibrio, para alcanzar la succión matricial de inicio de ensayo, es mostrada por el tramo A-B.

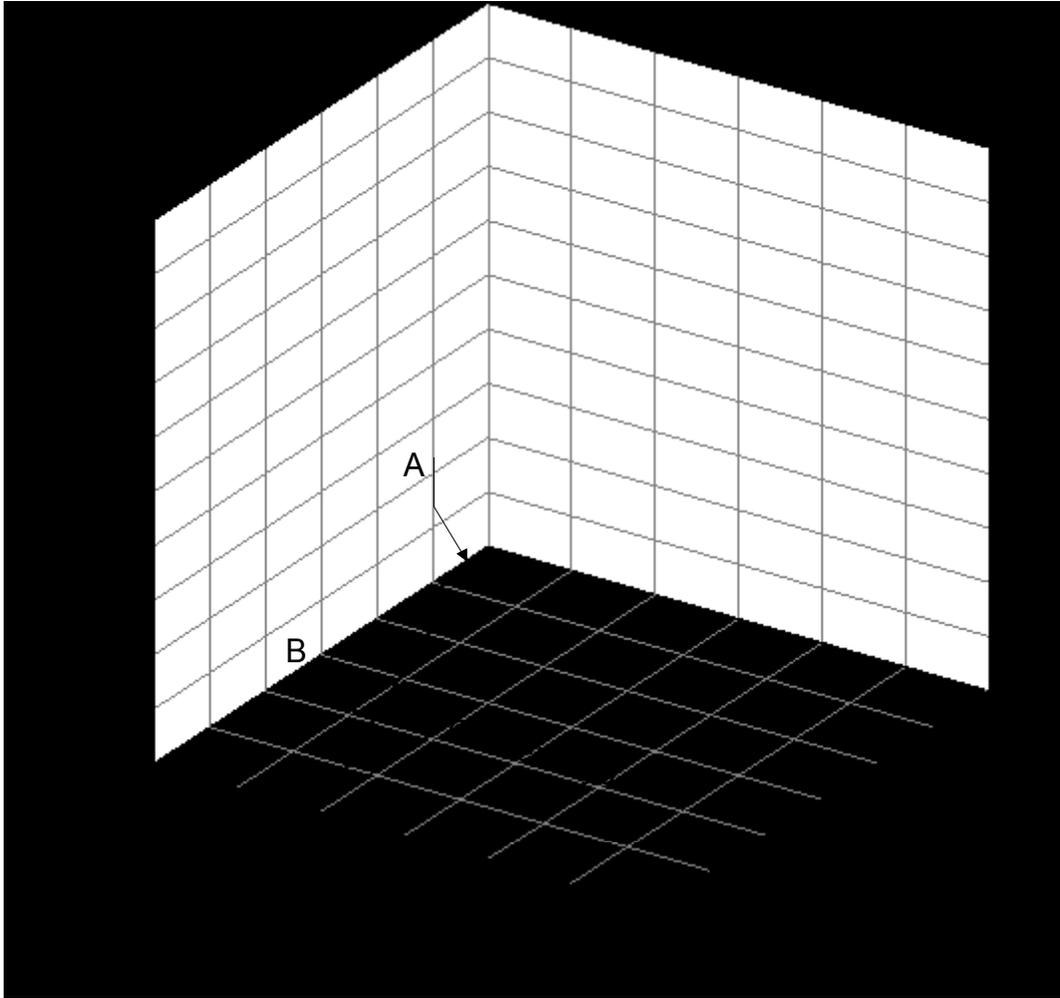


Figura 5.2 Trayectoria de tensiones del ensayo con control de succión IW de consolidación isotrópica y succión matricial constante de 100 kPa, mojado con relación tensión media neta ($p-u_a$) y tensión de corte (q) constante, y compresión triaxial a tensión controlada en condiciones saturadas.

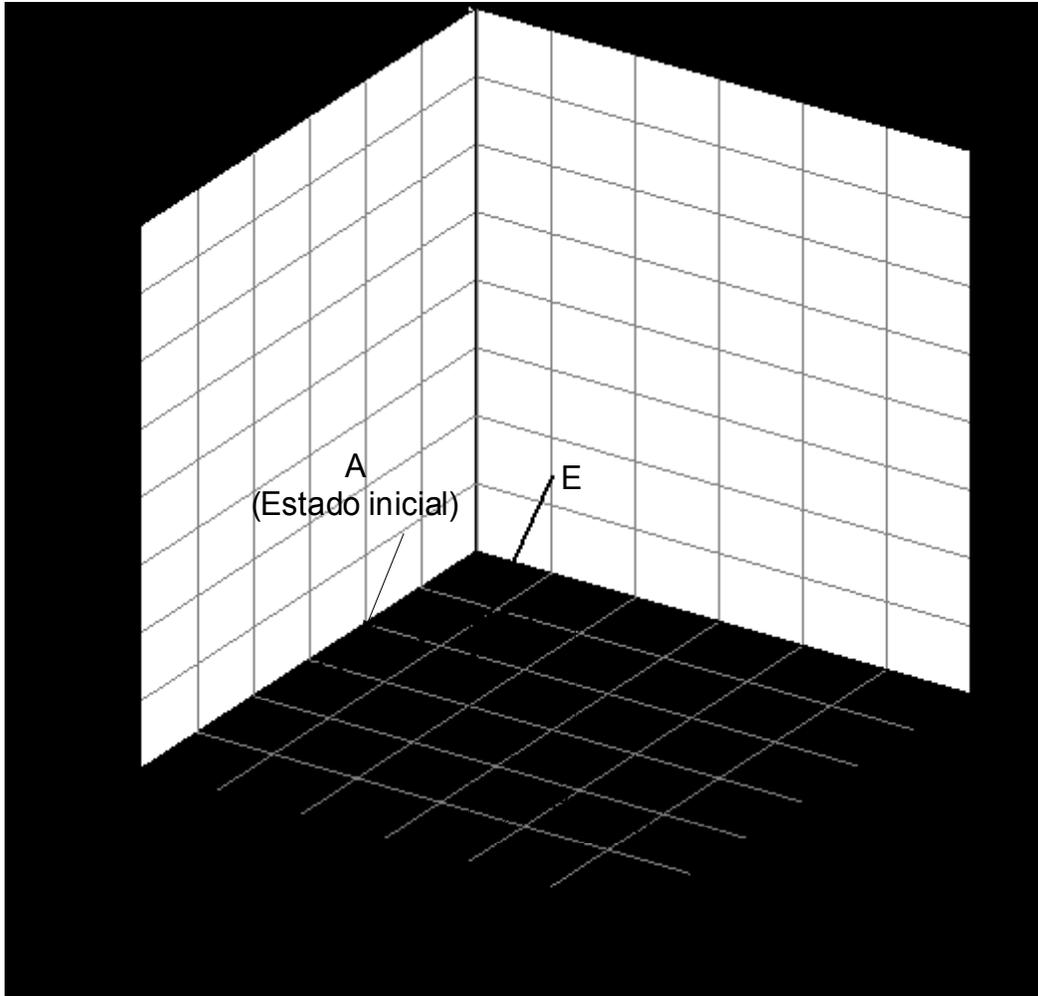


Figura 5.3 Trayectoria de tensiones del ensayo AW de consolidación anisótropa con relación $\eta=q/(p-u_a)$ constante y succión matricial constante de 100 kPa, posterior mojado con relación tensión media neta ($p-u_a$) y tensión de corte (q) constante, y compresión triaxial a tensión controlada en condiciones saturadas.

El ensayo AW, también, está compuesto por tres etapas: consolidación anisótropa bajo succión matricial constante; una posterior etapa de mojado con la relación de tensión de corte ente presión media neta, $\eta= q/(p-u_a)$, constante; y finalmente la etapa de compresión triaxial bajo succión matricial y tensión radial constantes. La etapa de equilibrio, para alcanzar la succión matricial de inicio de ensayo, es mostrada por el tramo A-B (de la Figura 5.3). La consolidación anisótropa (tramo B-C de la Figura 5.3) es realizada, bajo una succión matricial de 100 kPa y una relación de tensiones $\eta= q/(p-u_a)=0.75$, hasta alcanzar una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa. La etapa de mojado (tramo C-D de la Figura 5.3), desde una succión matricial de 100 kPa hasta 0 kPa, es realizada bajo una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa y la relación de tensiones $\eta=0.75$. Al igual que en el ensayo IW, la compresión triaxial (tramo D-E de la Figura 5.3) es llevada a cabo

bajo una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 200 kPa y una succión matricial de 0 kPa, que corresponden a las condiciones finales de la etapa de mojado, pero con una tensión de corte inicial $q=150$ kPa.

En el ensayo A1, la compresión triaxial con succión controlada se ejecuta después de una trayectoria de consolidación anisótropa-descarga-consolidación isotrópica. La etapa de equilibrio, para alcanzar la succión matricial de inicio de ensayo, es mostrada por el tramo A-B (de la Figura 5.4). Toda la trayectoria de consolidación, que es mostrada en la Figura 5.4 y descrita en la Tabla 5.2, corresponde al tramo B-C-D-E, se realizó bajo una succión matricial constante de 100 kPa. El tramo B-C corresponde a una consolidación anisótropa con una relación de tensiones $\eta=q/(p-u_a)=0.30$, hasta alcanzar una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa. Posteriormente, se realizó una descarga anisótropa (tramo C-D) hasta alcanzar una tensión media neta ($p-u_a$) de 115 kPa y una tensión de corte q de 10 kPa; seguida de una recarga isotrópica a succión constante hasta alcanzar una tensión media neta ($p-u_a$) de 400 kPa (tramo D-E). La compresión triaxial (tramo E-F) es llevada a cabo bajo una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 400 kPa y una succión matricial de 100 kPa, que corresponden a las condiciones finales de la etapa de recarga.

En el ensayo IWD, se siguió una trayectoria de compresión isotrópica y una posterior compresión triaxial, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa, después de un ciclo inicial de humedecimiento y secado, a tensión media neta ($p-u_a$) constante. La trayectoria completa del ensayo se muestra en la Figura 5.5 y es descrita en la Tabla 5.2. La primera etapa del ensayo IWD consiste en un ciclo de humedecimiento y secado (tramo A-B-C de la Figura 5.5) mediante cambios escalonados de la succión matricial, $s=200, 100, 10, 0$ y 100 kPa, bajo una tensión media neta constante de ($p-u_a$)=23 kPa. Una descripción detallada del procedimiento aplicado durante esta trayectoria de mojado- secado se presenta en el apartado 5.3.5. La etapa de compresión triaxial con control de succión se realiza después de la etapa de compresión isotrópica. Tanto la consolidación isotrópica (tramos C-D en la Figura 5.5) y la etapa de compresión triaxial (tramo D-E) son realizadas bajo una succión matricial constante de 100 kPa. La compresión triaxial se ejecuta bajo una tensión radial (presión de confinamiento) constante de 200 kPa que corresponde a la condición final de la consolidación isotrópica.

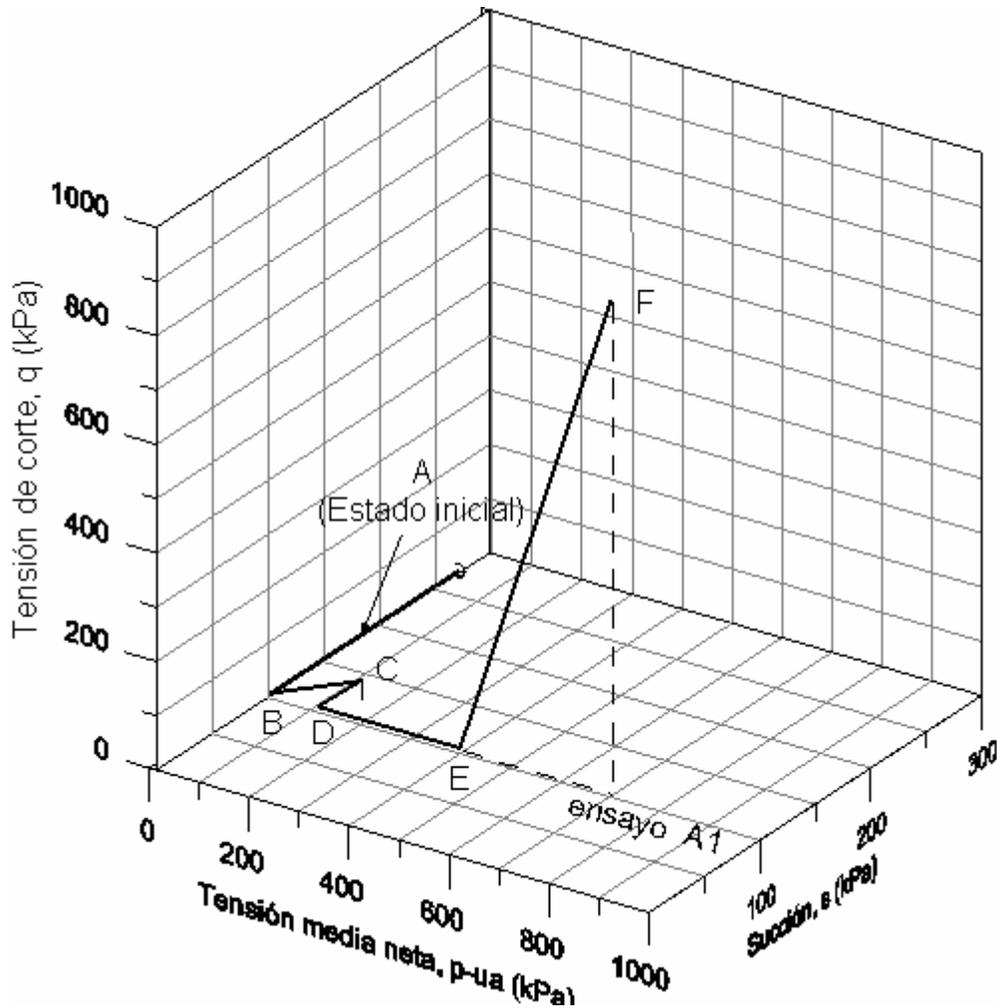


Figura 5.4 Trayectoria de tensiones del ensayo A1 de consolidación anisótropa con relación $\eta=q/(p-u_a)$ constante, posterior ciclo de descarga anisótropa-carga isotrópica bajo succión controlada, y compresión triaxial a tensión controlada, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa.

5.3 Procedimientos en los ensayos no saturados.

Estos ensayos constan de varias etapas, descritos en la Tabla 5.2, las cuales fueron agrupadas con base a los objetivos de la tesis para realizar una mejor descripción de los procedimientos y los resultados de los ensayos:

- Etapas de compresión isotrópica, con incrementos cuasi-continuos de tensiones, bajo condiciones de succión matricial constante de 10, 100 y 600 kPa, en el suelo en estudio. Ésta etapa se presenta en los ensayos I1, I2, I3, IW e IWD.

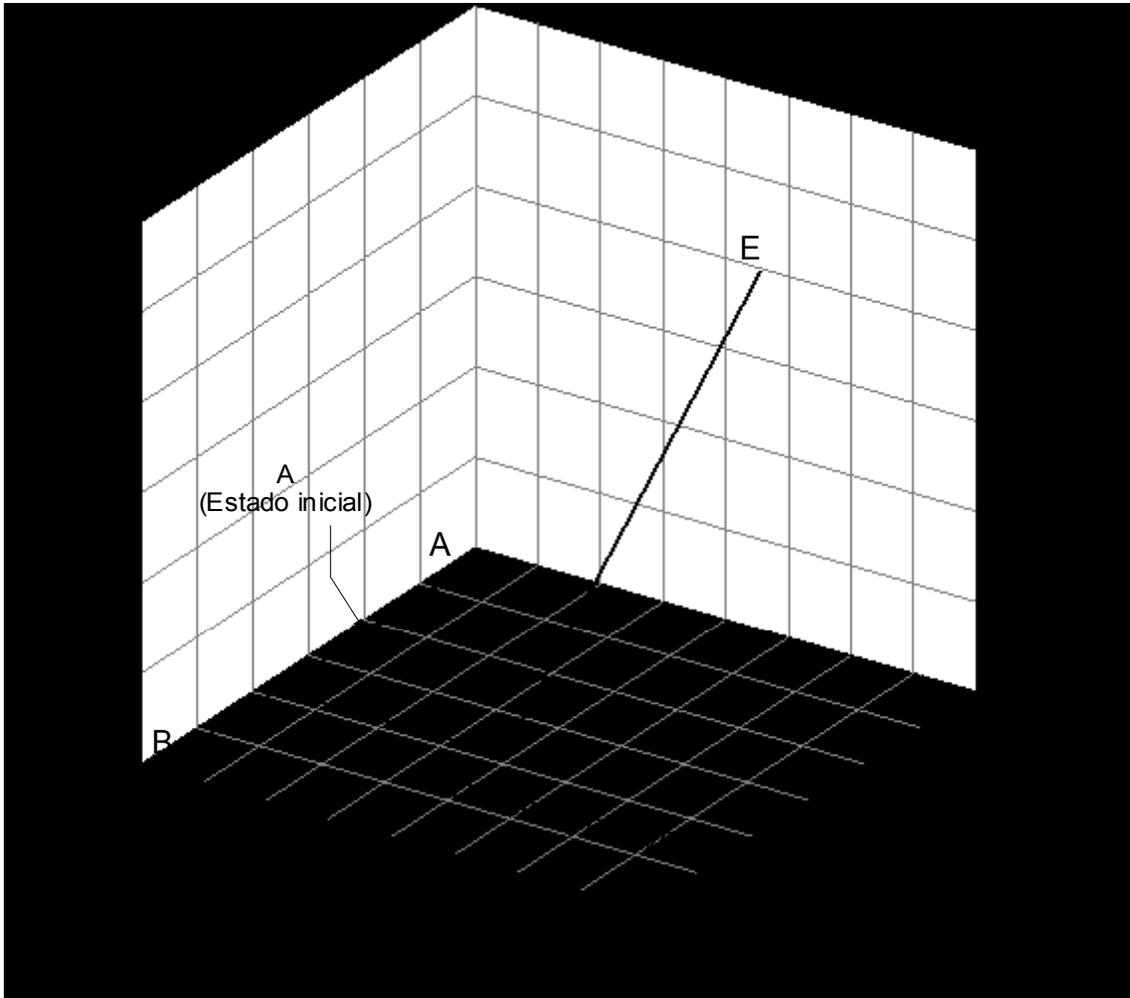


Figura 5.5 Trayectoria de tensiones del ensayo IWD con un ciclo de humedecimiento y secado a presión neta media constante, compresión isótropa y una posterior compresión triaxial, en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa.

- Etapas de compresión anisótropa, con incrementos cuasi-continuos de tensiones, con condiciones de succión matricial constante. Se realizaron bajo una succión matricial de 100 kPa. Esta etapa se presenta en los ensayos A1 y AW.
- Etapas de reducción cuasi-continua de succión matricial bajo condiciones de relaciones de tensión q/p constante. Estas etapas se presentan en los ensayos IW y AW.
- Etapas de compresión triaxial drenada con succión constante. Para su estudio se dividen en dos grupos: con diferentes tensiones medias netas ($p-u_a = 200$ y 400 kPa) bajo una succión matricial de 100 kPa; y con diferentes valores de succión matricial. Los resultados de éstas trayectorias se comparan, en los capítulos 6 y 7 con resultados de ensayos de compresión triaxial en especímenes saturados.

Otra etapa a considerar es la aplicación de una succión matricial desde la condición de succión inicial del espécimen colocado en el equipo triaxial (aproximadamente 270 kPa). Se realiza en todos los ensayos con el fin de alcanzar la succión matricial de inicio de prueba (de acuerdo a la trayectoria de tensión establecida). Esta es llamada etapa de equilibrio.

5.3.1 Montaje del espécimen.

5.3.1.1 Saturación de discos cerámicos. Medida de cambios de volumen de suelo.

Para aplicar apropiadamente la succión matricial y realizar correctamente las medidas de cambio de volumen es necesario tener completamente saturadas de agua desaireada las cerámicas de alto valor de entrada de aire, AVEA, insertadas en el pedestal y el cabezal (Figura 3.10 del capítulo 3). Los discos cerámicos tienen un valor de entrada de aire de 1.5 MPa. La saturación de las cerámicas se realizó mediante la aplicación de altas presiones de agua desaireada (por solución de aire) con el mismo procedimiento utilizado por Romero (1999) y Barrera (2002). Cámaras especiales fueron desarrolladas para saturar y presurizar los discos cerámicos fuera del triaxial, y una bureta graduada e instrumentada electrónicamente fue conectada al compartimiento de salida de agua. El aire fue eliminado de los discos cerámicos por flujo de agua bajo un gradiente alto de presiones, con la salida del flujo a la presión atmosférica. La condición de flujo establecido se utiliza para evaluar la permeabilidad de la cerámica AVEA y asegurarse de que no esté agrietada. Después la válvula de salida del flujo se cierra y se deja bajo presión el sistema por varias horas con el fin de disolver el aire atrapado en poros microscópicos (Ridley y Wray, 1996). Una descripción más detallada de este proceso se presenta en el capítulo 3. Las cerámicas fueron saturadas de nuevo después de cada ensayo de larga duración. Entre los períodos de ensayos consecutivos las cerámicas fueron mantenidas remojadas en agua para evitar su secado y la formación de canales de aire continuos.

El comportamiento de los discos cerámicos AVEA fue probado ante la aplicación de distintas diferencias de presiones, menores a su valor de entrada de aire, entre los dos orificios de acceso de la cámara de saturación: una presión alta de aire (u_a) aplicada en la entrada de la cámara y una presión menor de agua (u_w) en la salida de flujo. El nulo paso de aire sería indicativo de que

el valor de la diferencia de presiones ($u_a - u_w$) es menor al VEA del disco cerámico. Sin embargo, algunas ligeras variaciones en la medida de volumen de agua (en la bureta instrumentada) son detectadas. Las medidas de cambio de volumen de agua son principalmente afectadas por la evaporación de agua libre y acumulación de aire difuso (Romero, 1999), aunque también hay que considerar las pérdidas de agua en las conexiones del sistema de medida, de aplicación y drenaje de agua (tubos, bureta, interceptores de burbujas, etc.). Se realizaron calibraciones en las cámaras desarrolladas para saturación para tomar en cuenta estos efectos. Algunos resultados de estas calibraciones se presentan en la Figura. 3.31 y la Figura 3.32 (en el capítulo 3).

En estas condiciones, Romero (1999) menciona tres comportamientos diferentes en el cambio de volumen de agua: fase transitoria debido a un drenaje progresivo de agua; una condición de estado de flujo establecido cuasi-lineal debido a difusión de aire, evaporación de agua libre y pérdidas de agua en el sistema de medida; y ciclos de cambio de volumen de agua debido a fluctuaciones de temperatura. Al estar el equipo triaxial dentro de un cuarto de temperatura controlada, las fluctuaciones de temperatura son mínimas. La magnitud de éste último cambio de volumen es de alrededor $\pm 25 \text{ mm}^3$ (cercano al error por no linealidad e histéresis del sistema de medida) por un ciclo de variación. Estas variaciones son minimizadas al utilizar los valores promedios, obtenidos a partir de la tendencia seguida por las lecturas realizadas periódicamente. Al contar con la bureta instrumentada electrónicamente, y tener ensayos de larga duración, se pudo tomar un número considerable de lecturas para observar una tendencia confiable del comportamiento del cambio de volumen.

Durante los ensayos, el aire difuso fue periódicamente drenado y expulsado de las líneas de medida de cambio de agua y de drenaje. Las medidas de cambio de volumen de agua registradas por la bureta graduada instrumentada electrónicamente son corregidas con base a la pendiente (volumen de agua/tiempo) registrada en la condición de flujo establecido. Al término de cada etapa de la trayectoria de tensiones, se mantiene constante la condición final del estado tensional el tiempo necesario para detectar la fase de flujo establecido. Esta fase es utilizada para estimar la variación por difusión de aire, evaporación de agua libre y pérdida de agua en el sistema de medida, y corregir las medidas de cambio de volumen de agua considerando que ésta variación es constante durante toda la etapa.

5.3.1.2 Montaje del espécimen.

Antes de iniciar el montaje del espécimen es necesario preparar el equipo triaxial. La saturación total de las líneas de presión de agua y de drenaje se verifica circulando agua desaireada. Durante el lapso que transcurre entre la colocación del pedestal y el inicio del ensayo, existe el peligro de producirse la desaturación de los discos cerámicos AVEA. Las causas de ésta desaturación pueden ser dos. En primer lugar un ligero secado se produce en el disco AVEA al estar un tiempo considerable expuesto a la atmósfera. Una segunda causa podría ocurrir al entrar en contacto la muestra de suelo no saturado con el disco AVEA, debido a la succión que tiene la muestra al ser instalada (con valor muy cercano al que posee inmediatamente después de la compactación) y antes de aplicar presiones. El contacto directo de la muestra con el disco cerámico AVEA en éste estado podría provocar la cavitación del agua dentro de la cerámica y las líneas de drenaje. La segunda causa no representa problema en ésta investigación debido a que la succión de la muestra compactada utilizada (0.27 MPa) es muy baja, y bastante menor al valor de entrada de aire de la cerámica (1.5 MPa). Sin embargo, si podría existir un pequeño secado (cambio en el contenido de agua) del suelo provocado por una más alta presión negativa de agua en el disco cerámico. Para evitar la desaturación del disco cerámico AVEA (por exposición a la atmósfera), durante el montaje de la célula triaxial, se coloca una pequeña cantidad de agua sobre la superficie del disco AVEA del pedestal antes de colocar el espécimen de suelo, se retrasa al máximo la colocación del pedestal y se minimiza el tiempo del montaje (menos de una hora desde la colocación del pedestal hasta el inicio de la aplicación de presiones). El disco AVEA colocado dentro del cabezal está menos tiempo en contacto con la atmósfera y se mantiene saturado durante el proceso de montaje mediante la aplicación de agua en los tubos de drenaje. Los procedimientos del montaje de los dispositivos de medición (instrumentación electrónica), colocación de membranas y pintura se han expuesto en el capítulo 3.

Antes de colocar el espécimen compactado en la célula triaxial, se miden su diámetro y altura, y se obtiene su peso con el fin de conocer sus condiciones al inicio del ensayo. El contenido de agua (w_i) al inicio de ensayo es estimado con base al contenido de agua al final (w_f) y los cambios de contenido de agua (Δw) experimentados durante el ensayo. El valor así estimado es contrastado con el contenido de agua medido después de la compactación ($w_c=12\pm 0.2\%$), se ha encontrado que la diferencia entre los contenidos de agua w_i y w_c no es apreciable. La altura del

espécimen descargado presenta una expansión de 0.7 mm, en promedio, con respecto a la altura final del espécimen cargado ($\sigma_v - u_a = 0.27$ MPa) dentro del molde de compactación. El diámetro del espécimen, de 38mm, no presenta ningún cambio medible al ser extraído del molde de compactación. Por lo tanto, la expansión vertical por descarga, crea una diferencia entre los valores de peso volumétrico seco (γ_d), índice de poros (e) y grado saturación (S_r) dentro del molde con respecto a los valores fuera del mismo. En la Tabla 5.1 se muestran las condiciones de la probeta después de la compactación, midiendo las dimensiones con la muestra totalmente descargada: $\gamma_d = 14.9$ kN/m³, $e = 0.82$ y $S_r = 40\%$.

5.3.1.3 Aplicación de la sobrepresión de aire.

Ésta etapa corresponde a la aplicación de la presión de aire en los poros del espécimen (u_a) y unas tensiones ($p - u_a$ y q) en condiciones no drenadas de la fase líquida. Se inician todos los ensayos con una succión matricial de 270 kPa. La presión de aire es aplicada sosteniendo la tensión media neta ($p - u_a$) y la tensión de corte (q) por debajo de 25 kPa y 15 kPa respectivamente, con el fin de asegurar que el estado de tensiones de la muestra sea mantenido dentro del régimen elástico durante ésta fase. Las presiones de aire (u_a) seleccionadas, para aplicar la técnica de sobrepresión de aire, fueron 700 kPa para el ensayo I1 y 220 kPa para el resto de los ensayos. Las etapas posteriores de las trayectorias de tensiones se efectuaron manteniendo constante las presiones de aire seleccionadas.

La Figura 5.6 muestra la historia de la tensión radial, tensión de corte y de la presión de aire aplicadas durante esta fase, así como de las deformaciones axial y radial experimentadas. Esta gráfica, que presenta resultados extraídos de un ensayo realizado, es representativa de ésta fase. Inicialmente, se impone una baja tensión media neta ($p - u_a$) de 12 kPa (con $u_a = 0$) bajo condiciones no drenadas de la fase líquida, y se mantienen bloqueados tanto el pistón de carga como el pistón superior, con el objetivo de minimizar errores asociados con el ajuste de los LVDTs internos, y asegurar un buen contacto entre la membrana y de la célula de carga con el espécimen.

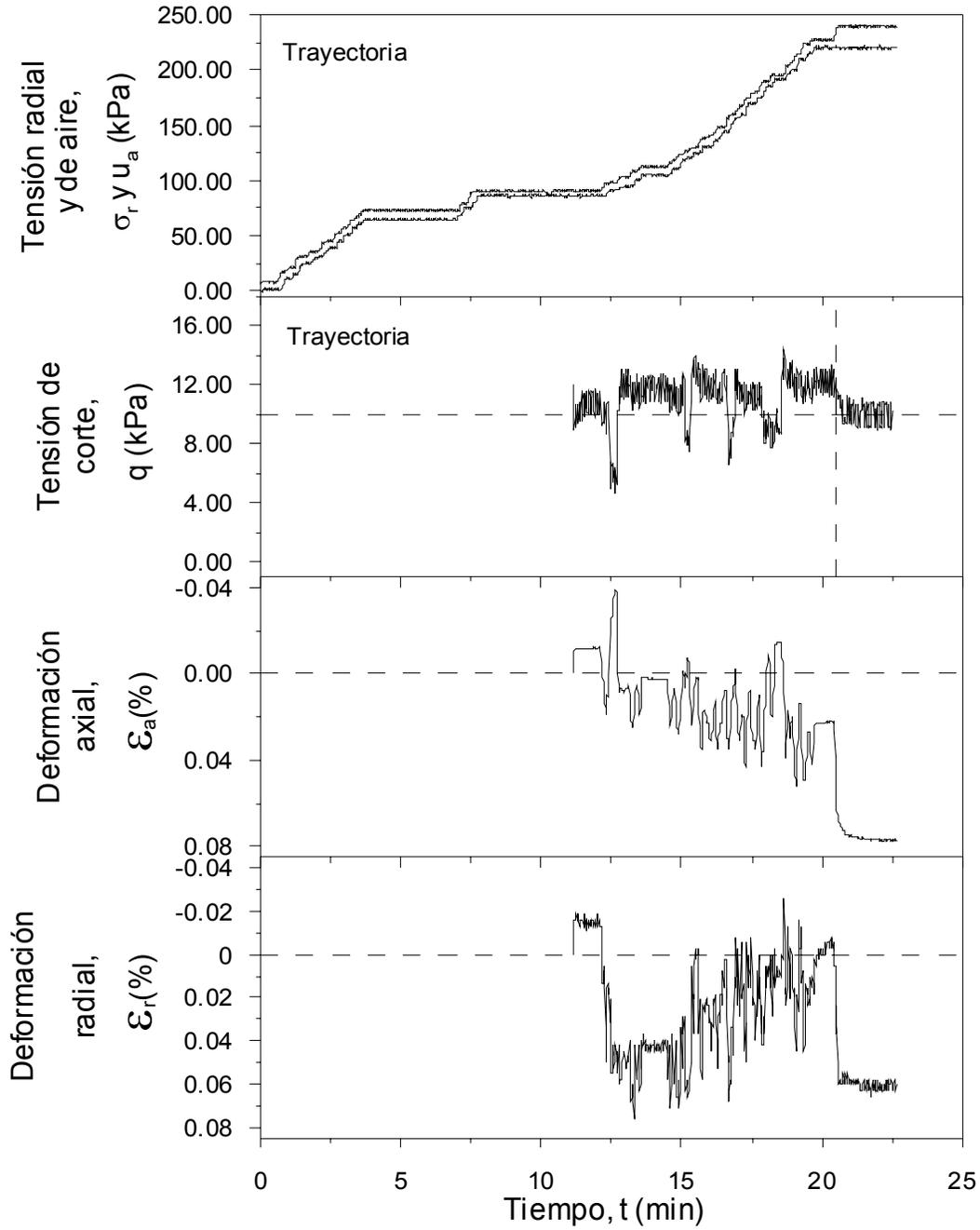


Figura 5.6 Historia de la tensión radial, tensión de corte y de la presión de aire suministradas, y deformaciones axial y radial experimentadas, durante la fase de aplicación de la sobrepresión de aire.

Posteriormente, los especímenes fueron llevados a las condiciones de inicio de la etapa de equilibrio (punto de tensión A de la Figura 5.7) incrementando por etapas tanto la presión de aire (u_a) como la tensión radial, σ_r (presión de confinamiento), de tal manera que se mantenga una diferencia de presión media neta ($p-u_a$) menor a 10 kPa, hasta alcanzar la presión de aire de poros (u_a) deseada. Para el ensayo aquí presentado, las condiciones finales en ésta fase son: presión de aire de poros ($u_a=220$ kPa) y tensión media neta ($p-u_a=23$). La etapa de equilibrio corresponde a la aplicación de una succión matricial (con el fin de alcanzar la succión matricial inicial de acuerdo a la trayectoria de tensión establecida).

Debido a que la presión mínima generada por el cilindro neumático impide la aplicación de la tensión de corte de 15 kPa cuando la tensión radial es menor de 65 kPa, la tensión de corte se aplica cuando la tensión radial alcanza 70 kPa. El procedimiento seguido para iniciar la aplicación de la tensión de corte mediante el control por ordenador, hasta alcanzar 10 kPa, y el desbloqueo del pistón de carga, se realiza lentamente para evitar que el espécimen sea alterado. Una vez iniciada la aplicación de la tensión de corte (q), ésta es mantenida en 10 ± 3 kPa durante el resto de esta etapa.

5.3.2 Etapa de equilibrio.

La etapa de equilibrio corresponde a la aplicación de una succión matricial ($s=u_a-u_w$) empleando la técnica de traslación de ejes, manteniendo constante la presión de aire de poros ($u_a= 700$ kPa para el ensayo I1 y 220 kPa para el resto de los ensayos), tensión media neta ($p-u_a=23$) y tensión de corte ($q=10$ kPa). Las succiones matriciales aplicadas son 10 kPa, 100 kPa, 200 kPa y 600 kPa. Las trayectorias de tensiones seguidas, durante esta etapa de equilibrio, para alcanzar las condiciones iniciales de succión matricial en las trayectorias de compresión (isótropa o anisótropa), se muestran en la Figura 5.7.

La Figura 5.7 es un esquema sin escala de las trayectorias seguidas desde el estado de tensiones de la muestra montada en el triaxial hasta la succión matricial aplicada (trayectorias O-A-B mostradas en la Figura 5.1, en el espacio $p-u_a-s$, considerando que la tensión de corte es mantenida constante). La etapa de la aplicación de sobrepresión de aire es representada por el segmento O-A, y la etapa de equilibrio es representada por el segmento A-B. La succión matricial

$(u_a - u_w)$ es aplicada usando la técnica de traslación de ejes (Hilf, 1956), manteniendo constante la presión de aire (u_a) seleccionada mientras es aplicada la presión de agua (u_w), punto B de la Figura 5.7. Las presiones de agua (u_w) aplicadas fueron de: 100 kPa en el ensayo I1; 120 kPa en los ensayos I2, A1, AW e IW; y 210 kPa en el ensayo I3. El ensayo IWD consiste en un ciclo de humedecimiento y secado con cambios escalonados de la succión matricial (tramos A-B, B-C, C-D, D-E y E-F en la Figura 5.7), a presión neta media constante ($p - u_a = 23$), realizados mediante cambios de la presión de agua manteniendo la presión de aire en 220 kPa. En éste caso consideramos el tramo A-B, con la aplicación de una succión de 200 kPa, como la etapa de equilibrio y el resto de los tramos como etapas de humedecimiento y secado previos a la aplicación de la etapa de consolidación isotrópica. La succión matricial en esta etapa se impone aplicando una presión de agua de 20 kPa mientras se mantiene constante la presión de aire de 220 kPa.

Durante esta etapa de equilibrio, bajo condiciones drenadas de las fase líquida y gaseosa, ocurren cambios volumétricos y de contenido de agua en la muestra debido a la aplicación de la succión matricial bajo las tensiones indicadas. Asumimos que la etapa finaliza cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse o, de acuerdo al criterio seguido por Sivakumar (1993) y Rampino *et al.* (1999), cuando el cambio de contenido de agua sea menor a 0.04% por día. El período de equilibrio más largo fue de, aproximadamente, 250 horas para alcanzar una succión matricial de 10 kPa.

Durante la etapa de equilibrio se sigue una trayectoria de cambio de succión matricial, bajo condiciones constantes de las tensiones media neta ($p - u_a = 23$) y de corte ($q = 10$ kPa), desde la succión matricial final en la etapa de sobrepresión de aire hasta alcanzar la succión matricial objetivo, tal como se muestra en la Figura 5.7. Estos bajos valores de tensiones media neta y de corte fueron seleccionados para evitar colapsos por mojado y poder detectar la tensión de fluencia ($p_0 - u_a$) en las subsecuentes trayectorias de compresión bajo succión matricial constante. Debido a los pequeños cambios que se generan en el espécimen durante la etapa de sobrepresión de aire, trayectoria O-A en el esquema de la Figura 5.7 (realizado sin medida ni control de succión) la succión matricial inicial en la etapa de equilibrio (punto A) es representada con una ligera variación con respecto a la succión matricial al iniciar del ensayo (punto O), aunque en realidad

la magnitud de ésta variación es desconocida. La succión matricial de un suelo con contenido de agua constante varía con el grado de saturación (S_r) y el tamaño de los poros, por lo cual es esperado que durante la etapa de sobrepresión de aire experimente un ligero cambio de la succión matricial debido a la pequeña compresión del esqueleto sólido, en condiciones de contenido de agua constante, durante el proceso de aplicación de presiones. Al encontrarse la muestra dentro un estado tensional elástico en la etapa de sobrepresión de aire, la reducción del tamaño de los poros (ligado a un incremento de succión) es considerada despreciable, y la succión matricial será afectada principalmente por el incremento de grado de saturación, S_r , (ligada a una reducción de la succión). Por lo tanto, aunque no se conozca con certeza la succión matricial de la muestra al finalizar esta etapa, puede suponerse que es sólo ligeramente menor que la succión matricial inicial (270 kPa).

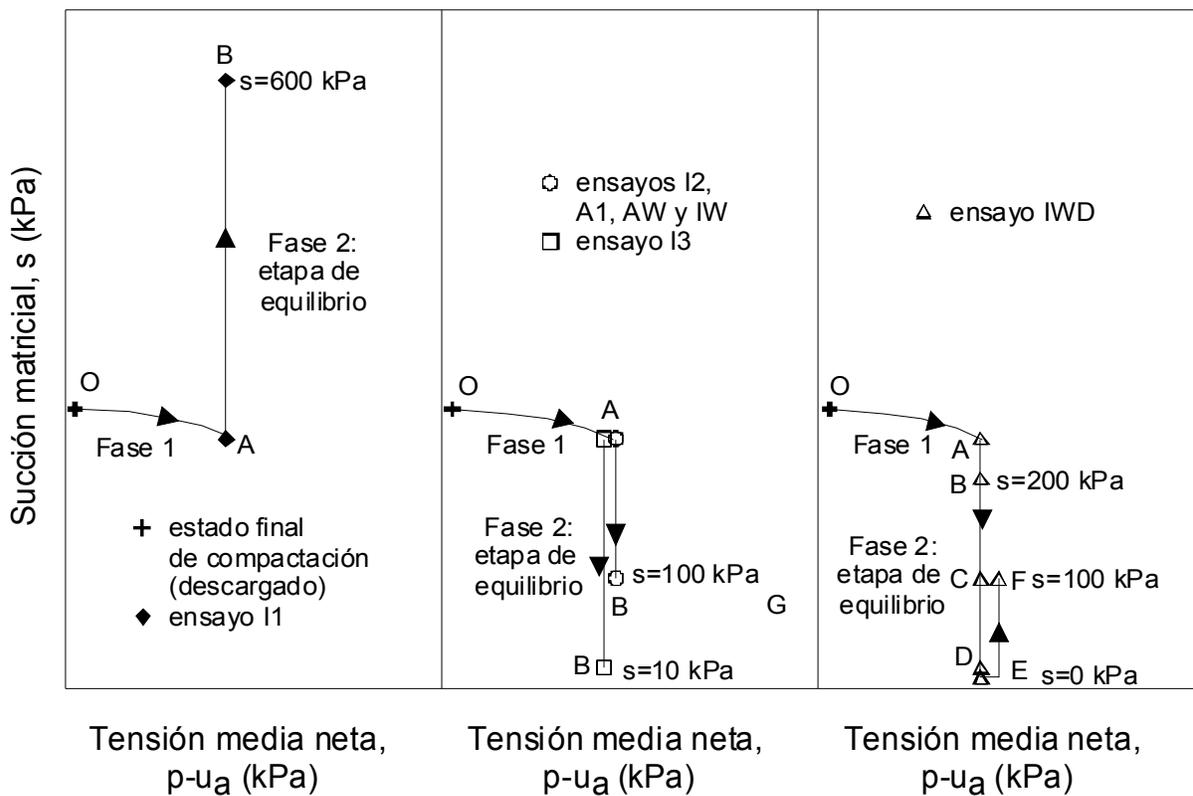


Figura 5.7 Esquema sin escala de la trayectoria de tensión media neta ($p-u_a$)-succión matricial (s) aplicados durante la etapa de equilibrio.

5.3.3 Etapa de consolidación isotrópica.

En los ensayos I1, I2, I3, IW e IWD, después de finalizar la etapa de equilibrio se siguieron trayectorias de compresión isotrópica, mediante incrementos de carga cuasi-continuos a una velocidad predefinida y bajo condiciones de succión matricial ($s=u_a-u_w$) constante. Al realizar estas series de trayectorias es posible establecer el efecto de la succión matricial sobre el comportamiento hidromecánico del suelo ante la aplicación de tensiones isotrópicas. Estas trayectorias corresponden a las etapas compresión isotrópica, tramo B-C en la Figura. 5.8 y tramo F-G del ensayo IWD en la Figura. 5.9, y están descritas en la Tabla 5.2. Durante ésta etapa se mantuvo un pequeño desviador (tensión de corte, q) de 10 kPa, con el fin de asegurar el contacto entre el espécimen y la célula de carga.

Las trayectorias fueron efectuadas incrementando la tensión media neta a una velocidad prefijada, hasta alcanzar estados vírgenes de tensión, bajo tres diferentes succiones matriciales: 600 kPa en el ensayo I1; 100 kPa en los ensayos I2, IW e IWD; y 10 kPa en el ensayo I3. Como la succión del suelo después de ser compactado fue de aproximadamente de 270 kPa, la trayectoria de tensiones seguida durante la etapa de equilibrio (A-B en la Figura. 5.8), para alcanzar las condiciones de inicio de los ensayos de compresión isotrópica, corresponden a trayectorias de mojado (ensayos I2, I3 y IW) y secado (ensayo I1), con lo cual son útiles para delimitar la superficie de fluencia. En el ensayo IWD la etapa previa a la compresión isotrópica corresponde al mojado de la muestra hasta saturarla y después secarla hasta una succión matricial de 100 kPa (véase la Figura. 5.9).

Las trayectorias de compresión isotrópica fueron realizados con incrementos de carga $\Delta(p-u_a)$ continua. La velocidad de aplicación de la presión de confinamiento (tensión radial) es gobernada electrónicamente con un sistema automatizado de motor paso a paso con control digital tarjeta-ordenador. El sistema es descrito en el capítulo 3. Los valores de máxima tensión media neta fueron seleccionados para determinar la tensión de fluencia en diferentes succiones y apreciar con claridad la respuesta post-fluencia debido al cambio en la superficie LC (del modelo presentado por Alonso, et al., 1990).

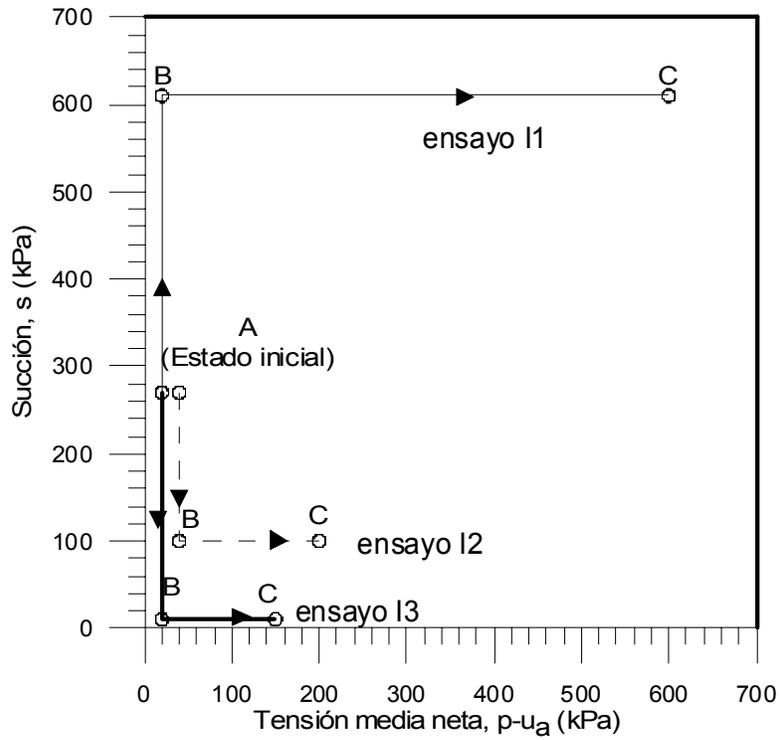


Figura. 5.8 Trayectoria de compresión isotrópica bajo condiciones de succión controlada (B-C) para los ensayos I1, I2 e I3.

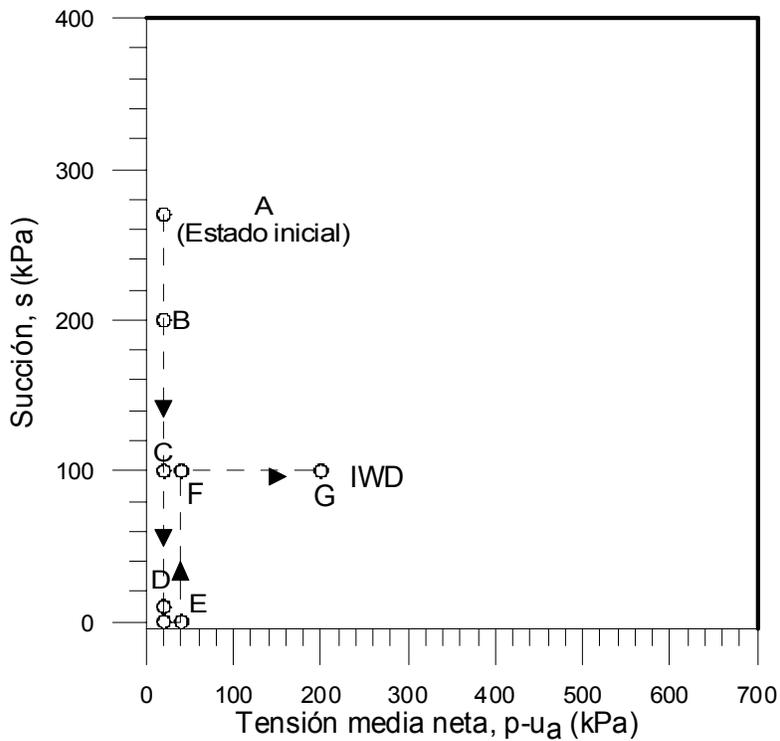


Figura. 5.9 Etapa de equilibrio (A-B); mojado y secado por etapas (B-C-D-E-F); y trayectoria de compresión isotrópica bajo condiciones de succión controlada (F-G) para el ensayo IWD.

En los ensayos realizados con incrementos de carga continua, sobre suelos saturados, la rapidez con que es disipada la presión intersticial de agua en exceso (Δu_w) es menor que la velocidad con que es generada al aplicar $\Delta(p-u_a)$; determinando que la velocidad de carga (v_p) tenga una considerable influencia sobre el comportamiento tensión-deformación observado. En suelos parcialmente saturados, la velocidad de carga (v_p) influye sobre el comportamiento tensión-deformación observado al afectar la succión matricial. En este trabajo, para suelos no saturados, la velocidad de carga (v_p) se refiere a la velocidad de aplicación de la tensión media neta. Cui y Delage (1996) muestran resultados de ensayos de compresión isótropa con control de succión, efectuados en un equipo triaxial sobre un suelo limoso compactado y no saturado; donde los ensayos realizados bajo carga continua mostraron menos cambios de volumen que los ensayos efectuados incrementando las cargas por etapas. La interpretación dada por los autores es la siguiente: cuando se efectúan las trayectorias por etapas, los incrementos de carga son grandes y súbitos, generando presión intersticial de agua en exceso (Δu_w) con una lenta disipación, lo que produce una inadecuada regulación de la succión en el espécimen.

Adicionalmente, en suelos parcialmente saturados, los cambios de tensiones producen variaciones en el grado de saturación y transformaciones en la curva de retención (por cambios en la geometría de los poros), generando cambios en la succión matricial. Estas variaciones son contrarrestadas por la entrada o salida de agua durante la aplicación de la técnica de traslación de ejes, al realizar trayectorias a succión matricial constante.

La velocidad de incremento de tensión media neta (v_p) utilizada en esta investigación fue lo suficientemente lenta para limitar las variaciones de la succión matricial por cambios del grado de saturación y geometría de los poros. Si la velocidad de incremento de tensión no es suficientemente lenta, las variaciones de la succión matricial generadas por cada pequeño incremento no son totalmente disipadas antes de aplicar el siguiente incremento, produciendo variaciones de succión matricial residuales que son acumuladas a medida que la tensión sea incrementada. Por lo tanto, la trayectoria seguida sería diferente a la planeada ante la falta de control de la succión.

Por otra parte, el agua debe migrar dentro del espécimen para equilibrar las presiones de agua, y lograr una distribución homogénea de la succión matricial. Las presiones de agua en exceso (Δu_w) generadas son diferentes en los bordes y el centro, (debido a la falta de uniformidad en las deformaciones por el efecto de la restricción en bordes). Con una velocidad de aplicación de tensiones suficientemente baja, aseguramos que la succión matricial sea constante (dentro de una cierta tolerancia) e igual a través de todo el espécimen.

Para una encontrar una primera aproximación de la velocidad de incremento de tensión isotropa (v_p) en ensayos triaxiales drenados fue utilizada la siguiente ecuación propuesta por Thomas (1987), citado por Sivakumar (1993) y Carvalho (2001), que proporciona el valor de equilibrio del exceso de presión intersticial de agua u_{eq} producido en la cara no drenada de una muestra saturada cuando es sometida a incrementos constantes de carga, con la tensión total que aumenta continuamente:

$$u_{eq} = \frac{v_p h^2}{2c_v}; \quad c_v = \frac{k}{\rho_w m_v} \quad (5.1)$$

donde h es la altura de la muestra; c_v es el coeficiente de consolidación; m_v es el coeficiente de deformación volumétrica; k es el coeficiente de permeabilidad; ρ_w es la densidad del agua.

Para materiales no saturados la velocidad de incremento de carga isotropa adoptada puede ser validada si al finalizar el proceso de carga las variaciones de deformaciones y humedades diferidos pueden considerarse despreciables. Tal criterio fue usado por Josa (1988) y Costa (2002).

El procedimiento seguido en éste trabajo ha consistido en adoptar una velocidad de aplicación de incremento de tensión isotropa (v_p) basado en la ecuación 5.1 y comprobar su efectividad de acuerdo con la propuesta de Josa (1988). Aplicando $k=5 \times 10^{-9}$ m/s, $m_v= 3.5 \times 10^{-2}$ cm²/kg y $h=38$ mm (drenaje del agua tanto por el borde superior como el inferior) en la ecuación 5.1 indica que una presión de agua en exceso de 1 kPa podría generarse, en un espécimen saturado, si el v_p seleccionado es 0.12 kPa/min. La permeabilidad saturada inicial del espécimen, que posee una estructura abierta, es $k=2.1 \times 10^{-7}$ m/s (obtenida durante el proceso de saturación de un espécimen, en un triaxial convencional), pero al esperar deformaciones importantes durante la consolidación

se seleccionó $k=5 \times 10^{-9}$ m/s para estimar v_p . m_v fue obtenido en un ensayo de consolidación sobre una muestra saturada realizado en un equipo convencional. En los ensayos no saturados, para garantizar el control de la succión en todo el espécimen, se optó por usar inicialmente una v_p de 0.03 kPa/min (1.8 kPa/h), debido a la lentitud observada en los cambios de contenido de humedad al finalizar los ensayos de consolidación en suelos no saturados (la permeabilidad disminuye con el grado de saturación del material). Con esta velocidad, la duración de la etapa normalmente dura entre 5.1 y 14.4 días dependiendo del valor final de la presión media neta en la etapa y el tiempo de equilibrio necesario después de alcanzarla, tal como se muestra en la Tabla 5.2.

La velocidad seleccionada fue considerada apropiada cuando la medida de deformaciones y del volumen de agua es despreciable después de mantener constante la tensión media neta ($p-u_a$) un tiempo considerable al finalizar la etapa. En la Figura. 5.10 se presentan los resultados de la evolución de las tensiones, deformaciones y variación de agua (en e_w) con el tiempo, durante la etapa de compresión isótropa, en $s=100$ kPa, del ensayo I2-1 (ensayo que falló en la etapa de compresión triaxial y es similar al ensayo I2, por lo cual no es incluido en la Tabla 5.2); estos resultados, que muestran cambios muy pequeños en deformaciones y cantidad de agua al finalizar la etapa, son representativos de los obtenidos en los ensayos I1, I2, I3, IW e IWD.

Sin embargo, aun cuando la velocidad (v_p) resulta apropiada, al finalizar la etapa de compresión isótropa, no fue posible evitar que el espécimen presentara pequeñas deformaciones y, principalmente, variaciones de agua después de fijarse la tensión media neta ($p-u_a$). Con el fin de asegurar condiciones estables en el espécimen (permitir la disipación de la presión de poro y la homogenización de la succión) se mantuvo constante el estado de tensiones durante un lapso de tiempo adicional entre el fin de la trayectoria de compresión isótropa y la etapa posterior del ensayo (trayectoria de compresión triaxial, mojado, etc.). Este lapso de tiempo o período de estabilización consiste en mantener constante el estado de tensiones hasta que las deformaciones y variación de agua llegan a ser estables. Al igual que en la etapa de equilibrio, asumimos que este período de estabilización finaliza cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse o, de acuerdo al criterio seguido por Sivakumar (1993) y Rampino et al. (1999), cuando el cambio de contenido de agua sea menor a 0.04% por día

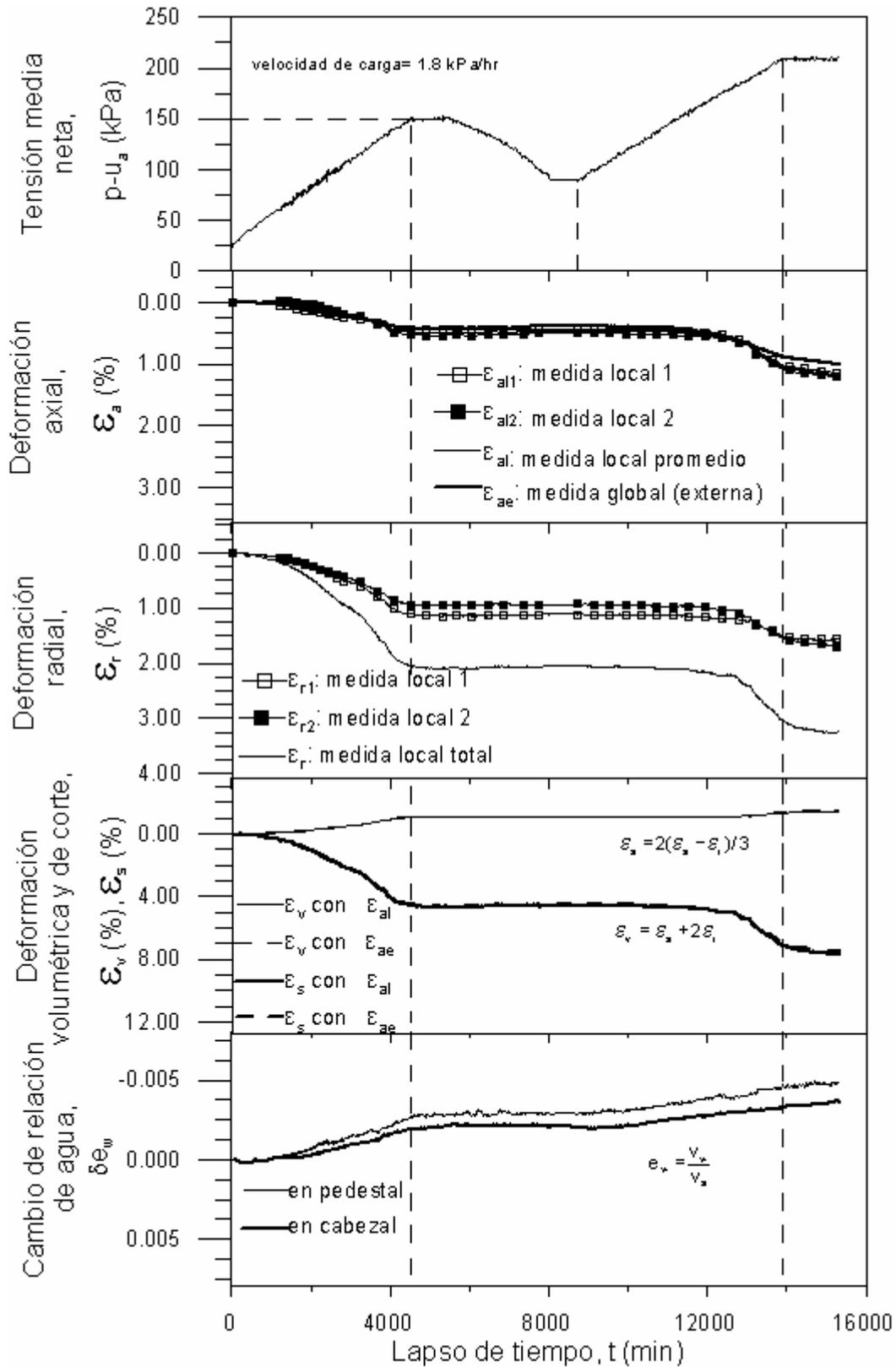
($de_w=0.001$). Este criterio es aplicado sobre la medida de variación de volumen agua corregida por difusión de aire, evaporación de agua libre y pérdidas de agua en el sistema de medida. El procedimiento de corrección se ha descrito en el apartado 5.3.1. Una de las ventajas que proporciona este equipo triaxial es la posibilidad de registrar continuamente las variaciones de volumen de agua, lo que permite optimizar el tiempo para detectar la estabilización del espécimen.

En este trabajo, el contenido de agua fue el de más lento en equilibrarse. Normalmente el período de equilibrio tiene una duración entre 0.42 y 0.96 días (14 y 23 horas). En el ensayo I3, con una succión matricial de 10 kPa, el período de equilibrio aplicado fue excesivamente largo (10.5 días) debido a cuestiones particulares presentes en ésta trayectoria que son descritos en el capítulo 6.

5.3.4 Etapa de consolidación anisótropa.

En los ensayos A1 y AW se siguieron trayectorias de consolidación bajo condiciones de tensión anisótropa, bajo condiciones de succión matricial ($s=u_a-u_w$) constante de 100 kPa. Las rampas de consolidación anisótropa se realizaron mediante incrementos de tensiones cuasi-continuos a una velocidad predefinida, siguiendo una relación de tensión de corte entre tensión media neta, $\eta=q/(p-u_a)$, constante. Esta relación es usada en la tesis debido a que las variables ($p-u_a$) y q fueron seleccionadas para describir el estado de tensiones del espécimen. Sin embargo como ordinariamente las trayectorias de compresión anisótropa son descritas con la relación de tensión radial neta (horizontal) entre la tensión axial neta (vertical), $K=(\sigma_r -u_a)/(\sigma_a-u_a)$, en algunos casos la trayectoria también es especificada usando ésta última relación. La correspondencia entre ambas relaciones es:

$$K = \frac{3-\eta}{2\eta+3} \quad (5.2)$$



Las trayectorias anisótropas se comparan con el ensayo de compresión isotrópica, realizado bajo succión matricial constante de 100 kPa (ensayo I2), para estudiar la dependencia de las trayectorias de tensiones sobre el comportamiento hidromecánico en suelos no saturados. También, es posible compararlas con trayectorias similares realizadas sobre especímenes saturados, que han presentado deformaciones volumétricas plásticas inducidas por mojado durante la saturación (ensayos SA y SM1 presentados en el apartado 5.4.3), para estudiar la influencia de la historia de tensiones sobre el comportamiento hidromecánico anisótropo en suelos compactados.

En la Figura. 5.11 y Figura. 5.12 se muestran las trayectorias de compresión anisótropa seguidas en los ensayos saturados A1 y AW. Las relaciones de tensión $\eta = q/(p-u_a)$ utilizadas durante el proceso de carga anisótropa fueron 0.38 y 0.75 (ó $K = (\sigma_r - u_a)/(\sigma_a - u_a)$ igual 0.70 y 0.5) en los ensayos A1 y AW respectivamente. Estas trayectorias, que corresponden a las etapas B-C, son representadas tanto en el espacio $(p-u_a)-q-s$ en la Figura. 5.11 como en el plano $(p-u_a)-q$ en la Figura. 5.12. Las figuras también presentan la trayectoria isotrópica seguida en el ensayo I2 ($K=1$). La etapa de equilibrio previa a la compresión se representa en el espacio $(p-u_a)-q-s$ por el tramo A-B en la Figura. 5.11. Ésta etapa de equilibrio corresponde a la aplicación de una succión matricial de 100 kPa desde las condiciones de inicio del ensayo (final de sobrepresión de aire), la cual fue descrita en el apartado 5.3.2.

Antes de iniciar las trayectorias de compresión anisótropa, a partir de la condición final de la etapa de equilibrio, el estado tensional es modificado bajo succión matricial constante ($s=100$ kPa), para alcanzar un estado igual a la relación de tensiones η de la trayectoria correspondiente (η igual 0.38 o 0.75). Para ello la tensión media neta $(p-u_a)$ es reducida, manteniendo la tensión de corte ($q=10$ kPa) hasta llegar a la relación de tensiones η deseada.

Las trayectorias de compresión anisótropa fueron efectuadas incrementando la tensión media neta, $(p-u_a)$ a una velocidad prefijada v_p de 0.03 kPa/min (1.8 kPa/h), igual a la usada en las trayectorias de tensiones isotrópicas, hasta alcanzar 200 kPa. Al mismo tiempo que es incrementada la tensión media neta en $\Delta(p-u_a)$, la tensión de corte también es incrementada en $\Delta q = \eta (\Delta(p-u_a))$, de tal manera que se siga la trayectoria de tensiones η deseada. Por lo tanto, para

los ensayos A1 y AW el incremento de tensión de corte, Δq , es igual a $0.38(\Delta(p-u_a))$ y $0.75(\Delta(p-u_a))$ respectivamente.

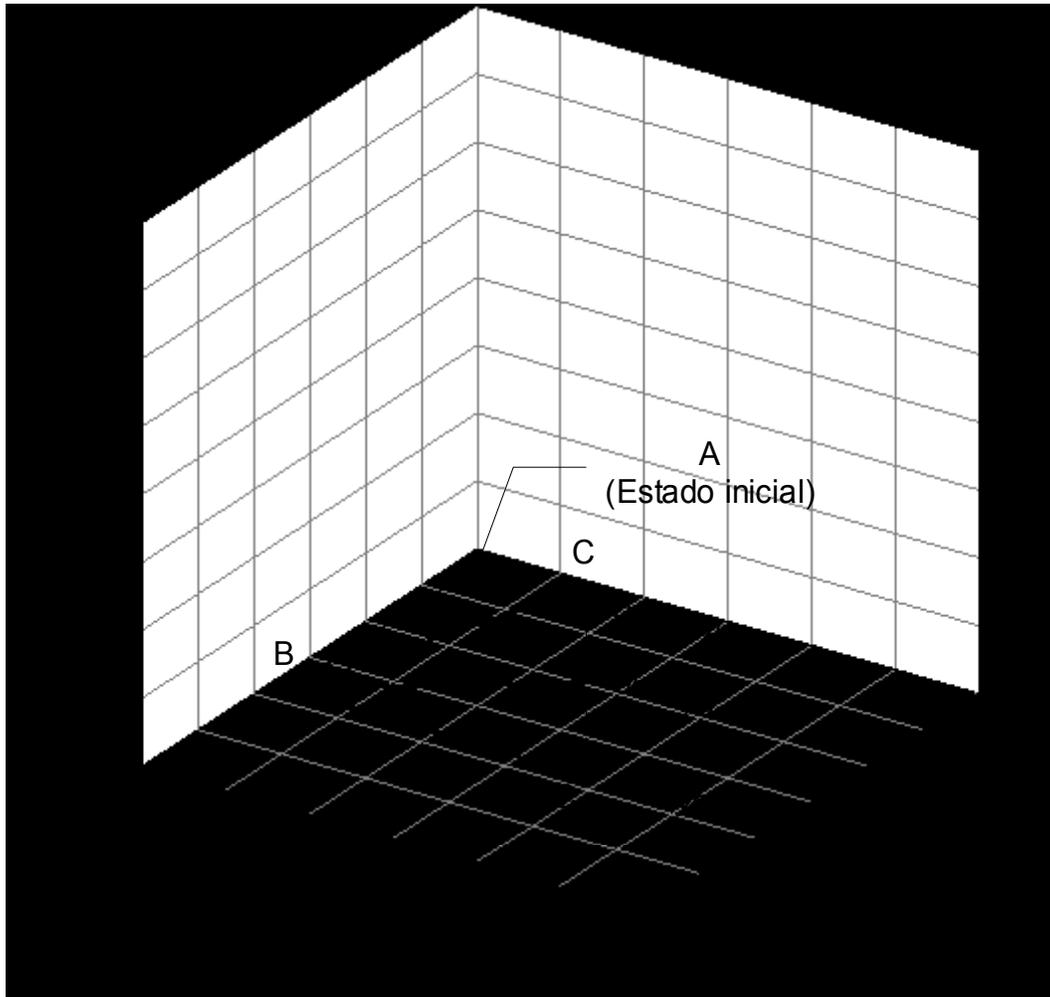


Figura. 5.11 Etapa de equilibrio (A-B) y trayectoria de compresión anisótropa bajo condiciones de succión controlada (B-C), en el espacio $(p-u_a)$ - s - q , para los ensayos I2, A1 y AW.

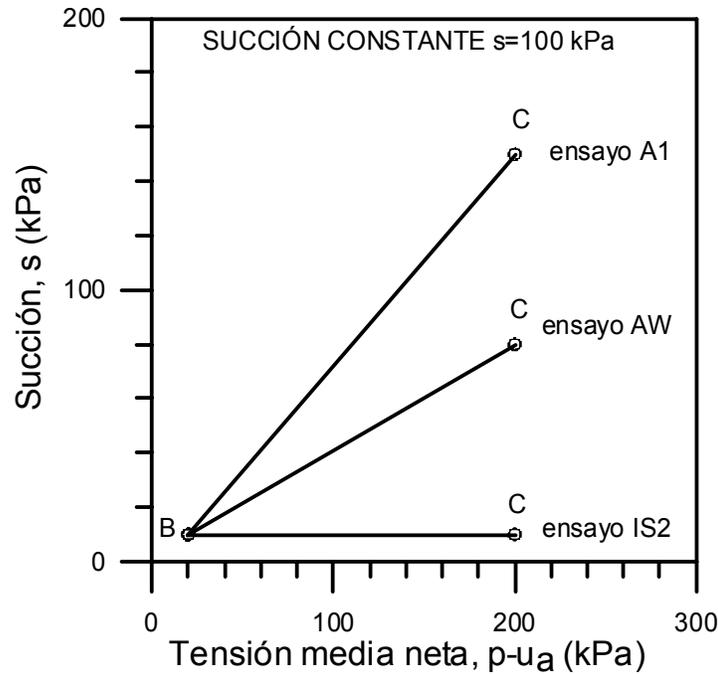


Figura. 5.12 Trayectoria de compresión anisótropa bajo condiciones de succión controlada (B-C), en el plano (p-ua)-s, para los ensayos I2, A1 y AW.

Como se menciona en el capítulo 3, en los ensayos realizados en este equipo triaxial las tensiones a controlar en los ensayos a succión matricial constante (la presión de aire u_a y la presión de agua u_w fijas) son: la tensión radial (o presión de confinamiento), σ_r , y la tensión de corte, q . La tensión radial, σ_r , es suministrada mediante un sistema de aire comprimido con un regulador de alta presión. La tensión de corte, q , es producida por el movimiento del pistón de carga sobre la base del espécimen de suelo que se genera por la entrada de aire a presión del cilindro neumático de diafragma Bellofram (σ_p). El pistón superior se mantiene fijo el pistón. Por lo tanto, con base a los valores predefinidos de η y $\Delta(p-u_a)$, para controlar las trayectorias de tensiones prefijadas se usan las siguientes relaciones:

$$\Delta\sigma_r = \left(\frac{3-\eta}{3}\right)\Delta(p-u_a), \text{ y} \quad (5.3)$$

$$\Delta q = \frac{3\eta}{3-\eta}(\Delta\sigma_r) \quad (5.4)$$

Considerando que $\Delta(p-u_a)$ es incrementado a una velocidad prefijada v_p de 0.03 kPa/min (1.8 kPa/h), las velocidades de incremento de tensión radial (v_r) y tensión de corte (v_q) prefijadas son:

$$v_r = 1.8\left(\frac{3-\eta}{3}\right), \text{ (kPa/h) y} \quad (5.5)$$

$$v_q = 1.8\eta, \text{ (kPa/h)} \quad (5.6)$$

En la

Tabla 5.3 se muestran las velocidades de aplicación de tensiones usadas en las trayectorias de compresión isótropa y anisótropa:

Tabla 5.3 Relación y velocidad de aplicación de tensiones seguidas en las etapas de compresión anisótropa de los ensayos triaxiales.

Trayectoria	Relación $\eta = q/(p-u_a)$	Relación $K = \sigma_r/\sigma_a$	v_r (kPa/h)	v_p (kPa/h)	v_q (kPa/h)	σ_r final (kPa)	$(p-u_a)$ final (kPa)	q final (kPa)
I2	-	1	1.8	1.8	0	200	200	10
A1	0.38	0.70	1.6	1.8	0.7	175	200	76
AW	0.75	0.5	1.4	1.8	1.4	150	200	150

La ejecución de las trayectorias de tensión se automatiza mediante dos reguladores, gobernados con motores paso a paso. Estos componentes se controlan mediante el sistema digital tarjeta-ordenador, con base a las medidas de tensión de corte proporcionado por una célula de carga interior. Con el sistema total, la velocidad de aplicación de las tensiones radial y de corte pueden ser controlada electrónicamente siendo posible obtener trayectorias con incrementos de tensión cuasi-continuos, a una velocidad predefinida. v_r y v_q .

Durante la ejecución de la consolidación anisótropa, con el fin de seguir fielmente la trayectoria de tensiones preestablecida, la tensión de corte, q , es calculada considerando el área transversal corregida del espécimen con base a los desplazamientos radiales registrados, en el centro de la muestra, por los sensores láser. La velocidad de aplicación v_q es seguida, por lo tanto, considerando las lecturas de la célula de carga y el área transversal corregida en el punto medio del espécimen. La descripción sobre la obtención de medidas de desplazamientos radiales se ha presentado en el capítulo 3.

Al igual que en la trayectoria de compresión isótropa, las velocidades de incremento de tensiones (v_p y v_q) utilizadas en ésta investigación son lo suficientemente lentas evitar cambios significativos en la succión matricial ($s = u_a - u_w$) y asegurar que ésta sea uniforme a través de todo

el espécimen. En esta trayectoria, se presentan cambios tanto de la tensión media neta como de la tensión de corte, que generan presión intersticial de agua en exceso (Δu_w) y cambios en la geometría de los poros del espécimen. En suelos no saturados, lo anterior, origina cambios en la succión matricial ($s=u_a-u_w$). El problema de seleccionar la velocidad de carga continua en ensayos triaxiales drenados en suelos saturados ha sido poco tratado (por ejemplo, Newson et al., 1997). El problema es más complejo en el caso de suelos parcialmente saturados, para asegurar el control de succión matricial, debido a que los cambios de tensiones producen, además de cambios en la presión intersticial de agua en exceso (Δu_w), variaciones en el grado de saturación y transformaciones en la curva de retención (por cambios en la geometría de los poros).

Para éstas trayectorias la velocidad de aplicación de incremento de tensión media neta (v_p) de 0.03 kPa/min (1.8 kPa/h), es igual a la empleada en las trayectorias de compresión isótropa, aunque con ello se tienen velocidades de aplicación de tensión de corte (v_q) diferentes en cada trayectoria (véase la Tabla 5.3). Ha sido adoptado el criterio de tener constante v_p , debido a que en las trayectorias realizadas en el presente trabajo, en esta etapa, predominan la tensión media neta sobre la tensión de corte con las trayectorias $K=(\sigma_r - u_a)/(\sigma_a - u_a) \leq 0.5$. El coeficiente de empuje en reposo observado en la prueba de compactación (bajo similares condiciones a la preparación de las muestra usadas) en un edómetro con medida de la tensión lateral, fue de $K_0 \approx 0.5$ (véase capítulo 4).

La velocidad seleccionada es considerada apropiada, debido a que las medidas de deformaciones y del cambio de volumen de agua son despreciables después de mantener constantes la tensión media neta y la tensión de corte un tiempo considerable, al finalizar la etapa. La Figura. 5.13 presenta resultados de la evolución de las tensiones, deformaciones y variación de agua (en $e_w=V_v/V_s$) con el tiempo durante la etapa de compresión anisótropa, en $s=100$ kPa, del ensayo AW. Estos resultados muestran cambios muy pequeños en deformaciones y cantidad de agua al finalizar la etapa. Después de un cierto de tiempo de finalizar la etapa, las variaciones de las deformaciones volumétricas (ε_v) con el tiempo son despreciables, sin embargo las deformaciones de corte (ε_s) continúan a una tasa de aproximadamente 2.5×10^{-4} %/min. Este comportamiento podría ser atribuido más a un fenómeno de fluencia continua bajo una carga sostenida (creep), que a una velocidad inadecuada de aplicación de tensión de corte. Los resultados en la trayectoria

A1 son similares al observado en la trayectoria AW, pero presenta variaciones despreciables de deformación de corte con el tiempo después de finalizar la trayectoria.

Al igual que en las trayectorias de compresión isotrópica, para asegurar condiciones estables en el espécimen (permitir la disipación de la presión de poro y la homogenización de la succión), se mantuvo constante el estado de tensiones un lapso de tiempo, posterior a la trayectoria de compresión anisótropa hasta que las deformaciones y variación de agua llegan a estabilizarse. Al igual que en las etapas anteriores, asumimos que este período de equilibrio finaliza cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse o, de acuerdo al criterio seguido por Sivakumar (1993) y Rampino et al. (1999), cuando el cambio de contenido de agua sea menor a 0.04% por día. El período de equilibrio tiene una duración 0.40 y 1.66 días para las trayectorias A1 y AW respectivamente.

5.3.5 Etapa de humedecimiento con succión controlada.

En los ensayos IW y AW se realizan etapas de reducción cuasi-continua de succión matricial, usando el método de traslación de ejes, desde una succión de 100 kPa a 10 kPa, y posteriormente alcanzar una succión de 0 kPa mediante la aplicación del método de columna negativa de agua. La Figura. 5.14 y la Figura. 5.15 muestran estas trayectorias en el plano $q-s$ y en el espacio tensión media neta- succión matricial-tensión de corte, $(p-u_a)-s-q$. El ensayo IWD consiste en mojado de la muestra, por escalones de succión, hasta saturarla y después secarla hasta una succión matricial de 100 kPa, previo a la realización de la trayectoria de compresión isotrópica (véase la Figura 5.5, la Figura 5.7 y la Figura. 5.9).

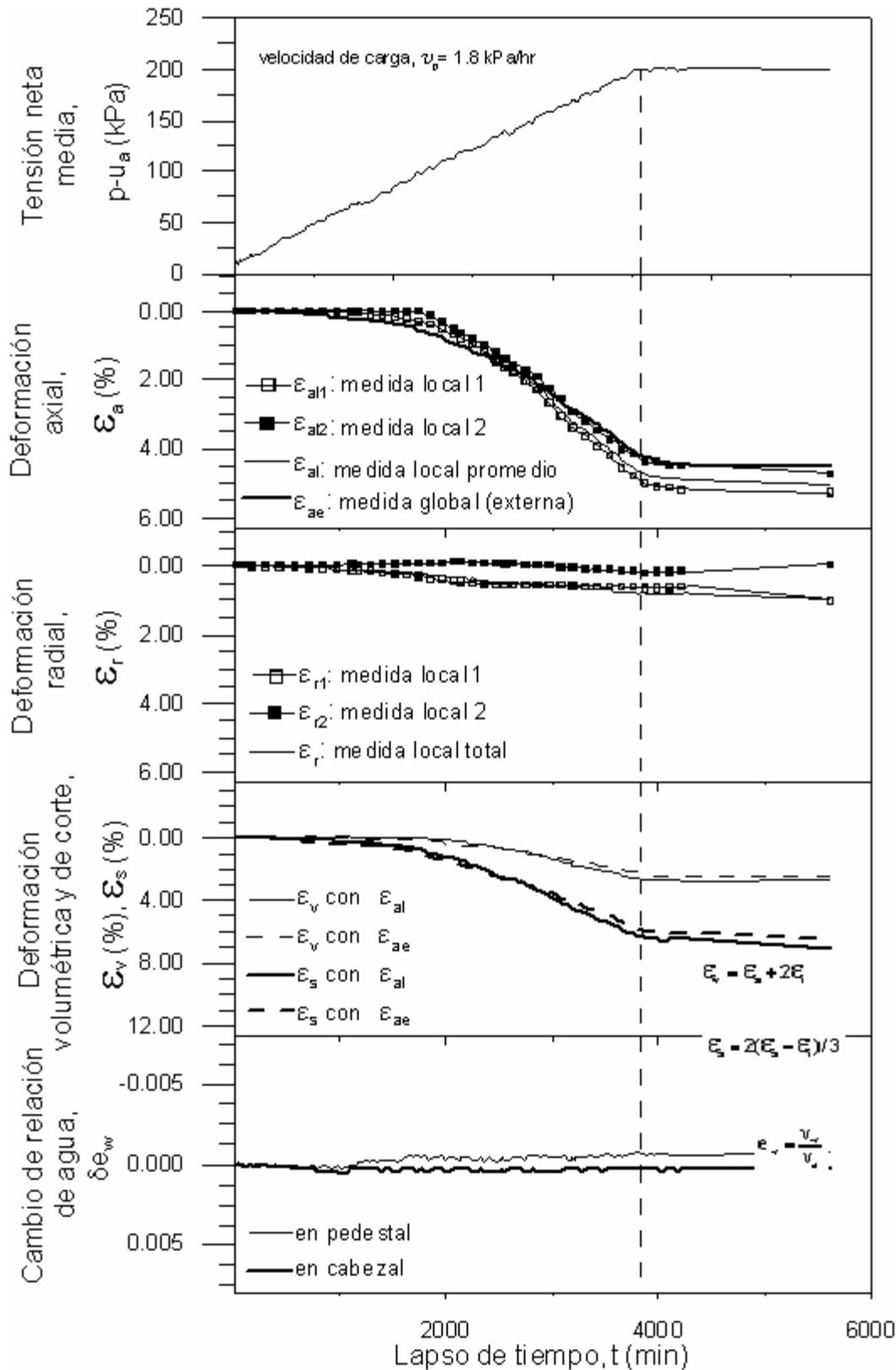
Las trayectorias de mojado en los ensayos IW y AW se presentan por lo tramos C-D en la Figura. 5.14 y la Figura. 5.15. En el ensayo IW la reducción de succión matricial (mojado) se llevó a cabo bajo condiciones de tensión isotrópica (relaciones de tensión de $q/(p-u_a)=0$), y en el ensayo AW bajo una relación $q/(p-u_a)$ constante de 0.75. La reducción cuasi-continua de succión matricial ($s=u_a-u_w$), usando el procedimiento de traslación de ejes, consiste en incrementar la presión de agua (u_w) a una velocidad prefijada mientras es mantenida constante la presión de aire (u_a) de 220 kPa. La presión de agua u_w es incrementada desde 120 kPa hasta 210 kPa para aplicar

sobre ambos bordes de la muestra una trayectoria de reducción de diferencia de presiones aire-agua, u_a-u_w , desde 100 kPa a 10 kPa. La velocidad de aplicación de la presión de agua es gobernada electrónicamente con un sistema automatizado de motor paso a paso con control digital tarjeta-ordenador. El sistema se ha descrito en el capítulo 3.

Esta etapa se realiza después de una de compresión isótropa en el ensayo IW, manteniendo una presión neta media ($p-u_a$) de 200 kPa y una tensión de corte q de 10 kPa. En el ensayo AW, la etapa de reducción de succión matricial es efectuada después de una trayectoria de consolidación anisótropa con relación de tensión constante de $q/(p-u_a)= 0.75$. Esta relación de tensiones es mantenida durante la trayectoria de mojado, con una presión media neta ($p-u_a$) de 200 kPa y una tensión de corte, q de 150 kPa.

El procedimiento usado permite obtener una historia continua de las deformaciones generadas en el espécimen y relacionarlas con la succión aplicada en los bordes. Este procedimiento, de reducción cuasi-continua de succión matricial aplicada en los bordes, difiere de los métodos tradicionalmente usados para inundar un espécimen: a) cambio de succión por etapas (usando alguna técnica de control de succión, por ejemplo traslación de ejes), y b) procedimiento de inundar el espécimen controlando el flujo de agua mientras que la succión es medida (infiltración). La selección de éste procedimiento de mojado se apoyó en el hecho de que la trayectoria genera un comportamiento hidromecánico acoplado sobre el espécimen, al producirse tanto flujo de agua como deformaciones. Para poder caracterizar adecuadamente este comportamiento acoplado es necesario efectuar el mojado usando pequeños escalones de succión matricial, evitando los cambios bruscos en su aplicación, pero esto genera la existencia un número de escalones y un tiempo de ensayo excesivamente largos.

Aplicando el procedimiento de mojado por reducción continua de la succión matricial, a una velocidad prefijada, se logra reducir la duración del ensayo. El mayor inconveniente consiste establecer la velocidad de aplicación de succión matricial ($s=u_a-u_w$), la cual deberá ser lo suficientemente lenta para asegurar que la succión matricial dentro de todo el espécimen sea igual a la diferencia de presiones u_a-u_w aplicada en sus bordes usando la traslación de ejes.



Una velocidad de reducción de succión matricial de 4.5 Pa/min (0.27 kPa/h) fue seleccionada considerando una duración de la trayectoria ($s=u_a-u_w$ de 100 a 10 kPa) de 14 días, para realizar el ensayo en un tiempo adecuado y asegurar una correcta aplicación de la succión. Sin embargo, la velocidad seleccionada no es considerada del todo apropiada debido a que se observaron deformaciones y flujo de agua de cierta magnitud al finalizar la etapa. Aún, con éste inconveniente, la velocidad de aplicación puede ser considerada adecuada para la fase inicial de ésta trayectoria, y los resultados obtenidos durante la trayectoria completa de mojado proporcionan información valiosa sobre el comportamiento hidromecánico de los suelos compactados. Los resultados de la evolución de las tensiones, deformaciones y variación de agua (en $e_w=V_v/V_s$) con el tiempo durante ésta etapa, para los ensayos IW y AW, son mostrados y discutidos en el capítulo 6.

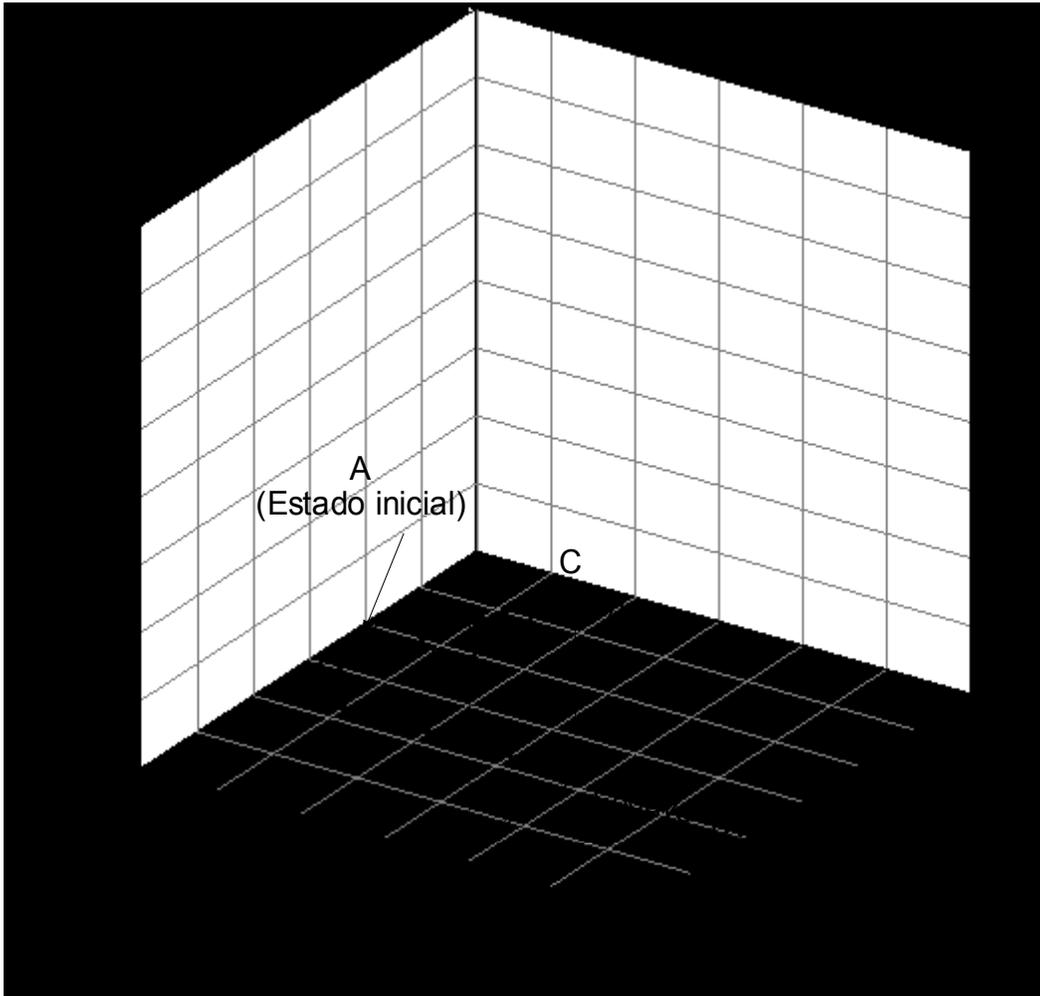


Figura. 5.14 Etapa de equilibrio (A-B), trayectoria de compresión, isotrópica o anisotrópica, bajo condiciones de succión controlada (B-C) y etapa de mojado (C-D), en el espacio $(p-u_a)$ - s - q , para los ensayos AW y IW.

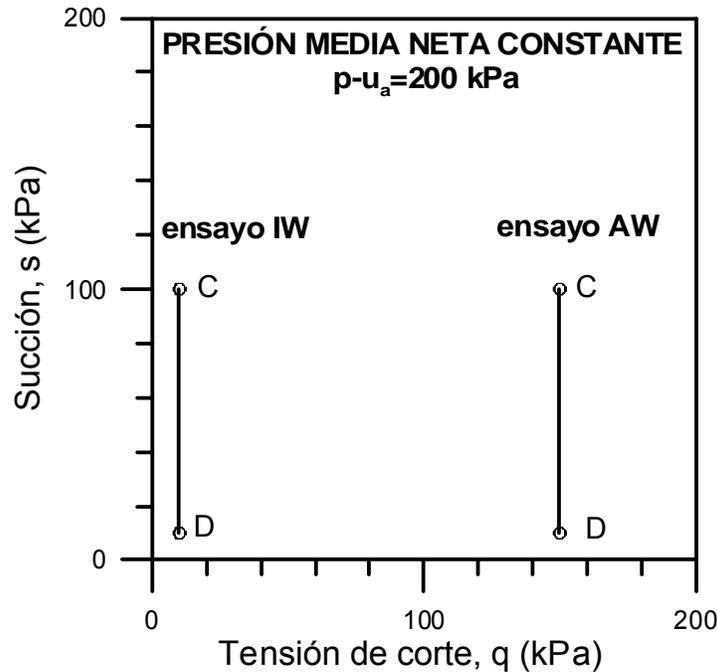


Figura. 5.15 Trayectoria de mojado bajo condiciones de relación $q/(p-u_a)$ constante (C-D), en el plano $(p-u_a)$ - s , para los ensayos IW y AW.

Con el fin de asegurar condiciones estables en el espécimen, se mantuvo constante el estado de tensiones un lapso de tiempo, entre el fin de ésta trayectoria y la etapa posterior del ensayo (trayectoria de compresión triaxial). Al igual que en las etapas anteriores, asumimos que éste período de estabilización finaliza cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse o, de acuerdo al criterio seguido por Sivakumar (1993) y Rampino et al. (1999), cuando el cambio de contenido de agua sea menor a 0.04% por día ($de_w/\text{día}=0.001$). Este criterio se aplica sobre la medida de variación de volumen agua corregida, registrada continuamente por la instrumentación electrónica del equipo triaxial. Con este criterio, el período de equilibrio resulta con una duración excesivamente largo, hasta de 24 días, con el fin de asegurar la homogenización de la succión en todo el espécimen.

Después de finalizar el período de equilibrio, de la trayectoria de mojado usando traslación de ejes, la trayectoria de succiones desde 8 kPa hasta valores cercanos a cero se sigue usando la técnica de columna negativa de agua (similar al procedimiento presentado por Alonso y Romero (2003)). Antes de emplear la columna negativa de agua, tanto la presión de confinamiento (σ_r) y tensión de corte (q) como las presiones de aire (u_a) y agua (u_w) son reducidas gradualmente hasta

obtener un estado de tensiones igual al anterior ($(s=u_a-u_w=10$ kPa; $(p-u_a)= 200$ kPa; y q de 10 kPa para el ensayo IW y 150 para el ensayo AW) pero con una presión de aire igual a la atmosférica. Entonces la presión de agua también es reducida a cero e inmediatamente es aplicada una succión de 8 kPa mediante la técnica de columna negativa de agua. Durante la reducción gradual de presiones, se busca mantener el estado de tensiones de la muestra dentro de la región elástica con el fin de evitar su alteración inducida por deformaciones permanentes. Lo anterior se logra reduciendo las presiones mediante pequeños escalones de 5 kPa siguiendo el orden: u_a , σ_r , q y u_w consecutivamente.

La columna negativa de agua se aplica usando una botella con agua, conectada por medio de un tubo al anillo interior (disco AVEA de 15 bar) del pedestal del triaxial. La botella se desplaza verticalmente por debajo del nivel del triaxial, procurando mantener la continuidad del agua en todo el sistema, con el fin de generar una presión negativa en la muestra igual al desnivel existente. Inicialmente una succión de 8 kPa se aplicó colocando el nivel de agua de la botella, aproximadamente, a 80 cm por debajo del nivel inferior de la muestra, y la presión de aire en condiciones atmosféricas. La tapa de la botella es cuidadosamente sellada para evitar la evaporación del agua. Posteriormente, la botella se eleva paso por paso, para lograr diferentes succiones (niveles de agua) hasta alcanzar una succión de aproximadamente igual a cero. El cambio de volumen de agua se mide por medio de buretas instrumentadas electrónicamente. La succión activada por este procedimiento, es mantenida un tiempo adecuado para permitir la estabilización del flujo de agua y las deformaciones.

En el ensayo IWD un ciclo de humedecimiento y secado, a tensión neta media constante, se realiza previamente a las trayectorias de compresión isotropa y compresión triaxial en condiciones de succión matricial constante de 100 kPa. La etapa de humedecimiento y secado consiste en cambios escalonados de la succión matricial, $s=200, 100, 10, 0$ y 100 kPa (tramos A-B, B-C, C-D, D-E y E-F en la Figura 5.7 y la

Figura. 5.9), a tensión media neta constante de 20 kPa y tensión de corte de 10 kPa, realizados mediante cambios de la presión de agua manteniendo la presión de aire en 220 kPa.

En este caso consideramos el tramo A-B, con la aplicación de una succión de 200 kPa, como la etapa de equilibrio y el resto de los tramos como etapas de humedecimiento y secado previos a la aplicación de la etapa de consolidación isotrópica. La succión matricial de equilibrio se obtiene aplicando una presión de agua de 20 kPa mientras se mantiene constante la presión de aire (en 220 kPa). La presión de agua se incrementa para activar los siguientes escalones de succión matricial de 100 kPa y 10 kPa (tramos B-C y C-D de la Figura. 5.9).

Posteriormente, la muestra se satura mediante una carga hidráulica de agua (de 70 cm) y con la presión de aire igual a la atmosférica (tramo D-E de la Figura. 5.9, con trayectoria $s=10$ kPa a 0 kPa). Para ello, en forma similar a los ensayos IW y AW, tanto la presión de confinamiento (σ_r) como las presiones de aire (u_a) y agua (u_w) son reducidas gradualmente hasta obtener un estado de tensiones final de $(p-u_a)=20$ kPa y $q=10$ kPa pero con $u_a=0$. Al igual que en los ensayos IW y AW, durante la reducción gradual de presiones, el estado de tensiones de la muestra se mantiene dentro de la región elástica reduciendo las presiones mediante pequeños escalones de 5 kPa, para evitar la ocurrencia de deformaciones permanentes.

Al finalizar la saturación del espécimen, las presiones de confinamiento (σ_r), de aire (u_a) y de agua (u_w) son incrementadas gradualmente para alcanzar un estado de tensiones final de $(p-u_a)=20$ kPa, $q=10$ kPa y succión matricial de $s=0$ pero con $u_a=u_w=220$ kPa, con el fin de realizar una trayectoria de secado usando la técnica de traslación de ejes. Una succión matricial de 100 kPa se aplica reduciendo la presión de agua hasta 120 kPa (tramo E-F de la Figura. 5.9). Entonces, la etapa de compresión bajo una succión matricial de 100 kPa se inicia (tramo F-G de la Figura. 5.9). Cada escalón realizado, se mantiene el tiempo adecuado para permitir la estabilización del flujo de agua y las deformaciones de acuerdo a los criterios establecidos en todas las etapas.

5.3.6 Etapa de corte.

En todos los ensayos se ejecutó una etapa de compresión triaxial (o de corte) con control de tensiones y de succión. La etapa consiste en incrementar la tensión axial mientras que la succión matricial y la tensión radial se mantienen constantes, y por lo tanto el incremento de la tensión de corte, q , será igual al incremento de la tensión axial, σ_a . Las distintas etapas de los ensayos se han agrupado en dos grupos para realizar una mejor descripción de los procedimientos y los resultados:

- Etapas de compresión triaxial drenada con succión constante, en dos diferentes tensiones medias netas ($p-u_a = 200$ y 400 kPa) bajo una succión matricial de 100 kPa. Estas trayectorias, efectuadas en los ensayos I2 y A1, son expuestas Figura 5.1 y Figura 5.4.
- Etapas de compresión triaxial drenada bajo succión constante, en diferentes succiones matriciales. Las trayectorias son expuestas en las Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5. Estas trayectorias se comparan con las trayectorias de compresión triaxial en especímenes saturados.

Las trayectorias de compresión triaxial se realizaron con control de tensión mediante incrementos de carga cuasi-continuos a una velocidad constante predefinida, bajo condiciones de succión matricial ($s = u_a - u_w$) y tensión media neta constante ($p - u_a$). Estas trayectorias fueron efectuadas incrementando la tensión de corte, Δq , a una velocidad prefijada, hasta alcanzar la rotura del espécimen. La velocidad de aplicación de la tensión de corte es gobernada electrónicamente con un sistema automatizado de motor paso a paso con control digital tarjeta-ordenador, con base a las medidas registradas por la célula de carga interna (véase capítulo 3).

La compresión triaxial, en todos los ensayos, se ejecuta a una velocidad de carga suficientemente lenta para asegurar la disipación continua de las presiones intersticiales generadas (Josa 1988). Al realizarse todos los ensayos con control de tensión, se obtienen datos de muy buena calidad durante el estado inicial de la prueba pero en existen algunos inconvenientes durante el estado final, cerca de la falla (o estado crítico) del espécimen. En estados cercanos a la falla se producen grandes deformaciones con incrementos pequeños de carga, generando cambios importantes en el

área de la sección central del espécimen, variaciones de la succión matricial (por incrementos de la presión de agua intersticial) y una distribución no homogénea de ésta succión matricial.

La velocidad de corte fue seleccionada con base a los ensayos triaxiales bajo condiciones drenadas realizados en muestras saturadas. Los ensayos de corte en muestras saturadas se realizaron manteniendo los incrementos de presión intersticial en valores menores a 5 kPa, de tal manera que las condiciones drenadas se alcanzaron durante todo el ensayo. Para el ensayo de corte drenado con tensión media efectiva inicial de 400 kPa, la velocidad mínima alcanzada (en la etapa cercana a la falla) fue de, aproximadamente, 5 Pa/s (0.3 kPa/min). Sin embargo, dado que la permeabilidad no saturada es menor que la saturada, se optó por un velocidad de 1 Pa/s (0.06 kPa/min). La forma de comprobar que la velocidad de falla no generara presiones de poro en la muestra, fue deteniendo la velocidad de deformación por un lapso de tiempo de 48 horas. Durante este periodo de tiempo no se detectaron cambios de volumen de la muestra, ni alteraciones en el contenido de agua.

La deformación de falla asumida fue de 20 %. En algunos ensayos, al llegar la tensión de corte a un determinado valor, la muestra presentó grandes deformaciones y un aumento considerable su área central. En ese caso, se ha asumido que ha ocurrido la falla de la muestra, y entonces se detiene el ensayo. En ambos casos, la aplicación de la tensión de corte se para, y se asume la terminación de la etapa cuando el contenido de agua y las deformaciones en el espécimen llegan a estabilizarse o, de acuerdo al criterio seguido por Rampino et al. (1999), cuando el cambio de contenido de agua sea menor a 0.04% por día.

5.3.7 Medidas finales.

Después de finalizar la etapa de corte, la tensión de corte se reduce a 10 kPa y las presiones de aire, de agua y de confinamiento se reducen, alternadamente, hasta cero. Posteriormente, el pistón de carga se bloquea y la tensión de corte se reduce a cero. Entonces, la muestra se saca del pedestal y la membrana se retira cuidadosamente. Las muestras se miden (altura y diámetro) y pesan inmediatamente después de ser retirada la membrana. Después, la muestra se coloca en el horno por tres días y, finalmente, se pesa para obtener su peso seco. El peso húmedo final y el

peso seco de la muestra se han usado para evaluar los cambios de contenido de agua medidos durante el ensayo.

5.4 Programa y trayectorias de los ensayos triaxiales saturados.

5.4.1 Introducción.

Las trayectorias realizadas en los ensayos triaxiales sobre muestras en condiciones saturadas se ejecutaron en la célula triaxial convencional fabricada por GDS Instrument Ltd. (descrito en detalle en el apartado 3.4.3). El estado tensional quedará determinado mediante dos variables independientes: la tensión media efectiva $p' = ((\sigma_a + 2\sigma_r)/3) - u_w$ y la tensión de corte, $q = \sigma_a - \sigma_r$, donde σ_a y σ_r son las tensiones principales axial total y radial total respectivamente. Las características iniciales de las muestras son las mismas que las usadas en los ensayos no saturados, descritos en la Tabla 5.1 y Tabla 5.5.

La realización de estos ensayos permitió caracterizar el comportamiento mecánico en condiciones saturadas, con la finalidad de validar la hipótesis empleada en el modelo conceptual constitutivo. El objetivo específico de este programa de ensayos fue la determinación de la forma de la superficie de fluencia de éste material, así como evaluar su comportamiento mecánico anisótropo, después de producirse el colapso por mojado, utilizando los datos de consolidación tanto isotropa como anisótropa y la etapa de rotura. También, se evalúan los parámetros intrínsecos de resistencia de las muestras en condiciones saturadas.

El programa consistió de seis ensayos triaxiales en muestras saturadas identificados con las letras SI, SA y SM (véase la

Tabla 5.4). La letra S indica que se ensayan las muestras en condiciones saturadas y las letras I, A y M hacen referencia a la trayectoria de consolidación previa a la trayectoria de compresión triaxial drenada: I cuando trayectoria de consolidación es isotropa, A cuando es anisótropa y M cuando se realizan trayectorias de consolidación múltiples. Mientras que los números hacen referencia de forma general a la descripción del ensayo. En la

Tabla 5.4 se resumen los detalles del programa experimental. En el capítulo 4 se menciona la técnica de fabricación de las probetas cilíndricas ($\phi = 38$ mm, $h = 76$ mm) empleadas. En la

Figura. 5.17, Figura. 5.18, Figura. 5.19 y Figura. 5.20 se presentan dichas trayectorias. Todas las trayectorias se realizaron en muestras con un estado inicial de $\rho_{d0} \approx 1.5 \text{ g/cm}^3$ ($e=0.83\pm 0.01$) y un contenido de agua de $12.0 \pm 0.2 \%$.

Tabla 5.4 Resumen de ensayos sobre suelos saturados.

Identificación del ensayo	Etapas del ensayo	Descripción
SI1	a) saturación b) compresión isótropa c) compresión triaxial drenada ($\Delta q/\Delta p' = 3$)	en $p'=9 \text{ kPa}$; $q=5 \text{ kPa}$; $u_w=3 \text{ kPa}$ p' : 6–200 kPa $q=5 \text{ kPa}$ $\sigma_r=\text{cte}=200 \text{ kPa}$
SI2	a) saturación b) compresión isótropa c) descarga isótropa d) compresión isótropa e) compresión triaxial drenada($\Delta q/\Delta p' = 3$)	en $p'=21 \text{ kPa}$; $q=5 \text{ kPa}$; $u_w=30 \text{ kPa}$ p' : 10–100 kPa $q=5 \text{ kPa}$ p' : 100– 50 kPa $q=5 \text{ kPa}$ p' : 50– 400 kPa $q=5 \text{ kPa}$ $\sigma_r=\text{cte}=400 \text{ kPa}$
SI3	a) saturación b) compresión isótropa c) compresión triaxial drenada ($\Delta q/\Delta p' = 3$)	en $p'=21 \text{ kPa}$; $q=5 \text{ kPa}$; $u_w=30 \text{ kPa}$ p' : 10–600 kPa $q=5 \text{ kPa}$ $\sigma_r=\text{cte}=600 \text{ kPa}$
SA	F: saturación G: compresión anisótropa	en $p'=21 \text{ kPa}$; $q=5 \text{ kPa}$; $u_w=30 \text{ kPa}$ p' : 12–307 kPa; q : 10-263 kPa; $\eta=0.86$
SM1	a) saturación b) compresión anisótropa c) descarga anisótropa d) compresión isótropa e) descarga isótropa	en $p'=21 \text{ kPa}$; $q=5 \text{ kPa}$; $u_w=30 \text{ kPa}$ p' : 12–200 kPa; q : 5-73 kPa; $\eta=0.36$ p' : 200-100 kPa; q : 73-40 kPa; $\eta=0.36$ p' : 100-300 kPa; $q=\text{cte}=40 \text{ kPa}$ p' : 300-100 kPa; $q=\text{cte}=36 \text{ kPa}$
SM2	E: saturación F: compresión isótropa G: descarga isótropa H: compresión anisótropa I: descarga anisótropa J: compresión anisótropa K: descarga anisótropa	en $p'=21 \text{ kPa}$; $q=5 \text{ kPa}$; $u_w=30 \text{ kPa}$ p' : 10–100 kPa $q=5 \text{ kPa}$ p' : 100–50 kPa $q=5 \text{ kPa}$ p' : 50–209 kPa; q : 5-187 kPa p' : 209-106 kPa; q : 187-63 kPa p' : 106-194 kPa; q : 72-211 kPa p' : 194-rotura kPa; q : 211-rotura kPa

I	Muestras consolidadas bajo tensión isótropa.
A	Muestras consolidadas bajo tensión anisótropa.
S	Ensayos con el suelo saturado realizados en equipos convencionales.
SM	Ensayos con trayectorias de tensiones múltiples (isótropas y anisótropas)

Tabla 5.5 Condiciones iniciales, condiciones de prueba y resultados en la etapa de saturación.

Ensayo	condiciones iniciales			condiciones de prueba			resultados	
	e_0	w_0 (%)	Sr_0 (%)	p' (kPa)	q (kPa)	i^*	k_w^{**} (m/s)	Δe
SI1	0.831	12.0	0.39	9	5	3	2.6E-06	0.01
SI2	0.836	12.1	0.39	21	5	36	2.1E-07	-0.09
SI3	0.829	12.1	0.40	21	5	40	2.9E-07	-0.09
SA	0.831	12.1	0.39	21	5	36	2.7E-07	-0.07
SM1	0.827	12.1	0.40	21	5	36	1.7E-07	-0.03
SM2	0.823	11.9	0.39	21	5	36	2.7E-07	-0.06

* Gradiente hidráulico.

** Coeficiente de permeabilidad en condiciones saturadas

En las trayectorias SI2, SI3, SA y SM1 se trata de ver los efectos de las condiciones iniciales conocidas, de muestras que se saturan, caracterizando la posición de la superficie de fluencia del suelo saturado con deformaciones de colapso durante la etapa de saturación (Figura. 5.17, Figura. 5.18 y Figura. 5.19). Se trata también de evaluar su comportamiento mecánico anisótropo. En la trayectoria SI1, comparándola con las trayectorias SI2 y SI3, se busca caracterizar el efecto de las deformaciones inducidas por la saturación (colapso) sobre la presión de preconsolidación isotrópica. En las trayectorias SM1 y SM2 se analiza, mediante trayectorias de carga descarga, el efecto que tienen las deformaciones de consolidación sobre la posición de la superficie de fluencia y la relación entre deformaciones volumétricas y de corte. Finalmente, mediante las trayectorias SI1, SI2, SI3 y SM1 se ha evaluado el comportamiento de rotura del suelo saturado, y el efecto de la presión de preconsolidación isotrópica sobre el comportamiento mecánico durante las trayectorias de compresión triaxial.

5.4.2 Etapa de saturación.

Las muestras fueron saturadas mediante un flujo de agua desairada y desmineralizada. El proceso de saturación de las muestras SI2, SI3, SA, SM1 y SM2 comenzó con una presión de confinamiento de 40 kPa (σ_r) y una presión de agua intersticial por debajo de la muestra de 30 kPa (u_{w1}), dejando una línea de drenaje por encima de la muestra a presión atmosférica (u_{w2}). El

estado de tensiones totales es cercanamente isótropo ($\sigma_r = \sigma_a = p$), aunque para asegurar el contacto de la muestra con la célula de carga, es aplicada una pequeña tensión de corte $q=3$ kPa.

Este proceso de saturación corresponde a una trayectoria de mojado de la muestra, desde las condiciones finales de compactación ($s=270$ kPa y Grado de saturación, $S_r=40\%$) hasta alcanzar su saturación, bajo una tensión media total constante de 40 kPa. Al aplicarse simultáneamente las presiones de confinamiento total de $p=40$ kPa y de agua intersticial de $u_{w1}=30$ kPa, la entrada de agua generará un reducción de la succión hasta alcanzar la saturación de la muestra (succión $s=0$). Bajo condiciones saturadas, durante la etapa de flujo de agua al interior de la muestra, la distribución de la presión de agua intersticial no es uniforme a lo largo de su altura: por debajo de la muestra es de aproximadamente $u_{w1}=30$ kPa, y por encima igual a la presión atmosférica, $u_{w2}=0$ kPa (medido en la salida del flujo). Por lo tanto, la tensión efectiva promedio (p'), asumiendo una distribución lineal, será igual a:

$$p' = p - \frac{1}{2}(u_{w1} + u_{w2}) \quad (5.7)$$

Para este caso, la tensión efectiva promedio durante la etapa de saturación es de $p'=25$ kPa. En el ensayo SI1 el proceso de saturación es similar, pero se realiza con una presión de confinamiento de 10 kPa y una presión de agua intersticial por debajo de la muestra de aproximadamente 3 kPa, dejando, también, una línea de drenaje por encima de la muestra a presión atmosférica. La tensión efectiva promedio durante la etapa de saturación para éste ensayo fue de $p'=9$ kPa.

Durante el proceso de saturación (con duración máxima de 5 horas), las presiones de confinamiento y de agua intersticial se mantuvieron constantes, monitoreando el agua que entraba en la muestra por medio del controlador GDS Instrument Ltd del equipo triaxial. En la Figura. 5.16 se presenta la evolución con el tiempo del coeficiente de permeabilidad, de la tensión media efectiva promedio (se muestran los resultados de la ecuación 5.7, pero solo representan p' cuando se tiene condiciones saturadas en la muestra) y del gradiente hidráulico. Los valores del coeficiente de permeabilidad se presentan en la gráfica después de alcanzar 60 minutos, donde es posible suponer que la muestra se encuentra saturada (el flujo que entra es igual al flujo que sale). El coeficiente de permeabilidad, después de estabilizarse, es del orden de 2×10^{-6} m/s, con un

gradiente hidráulico cercano a 3 para el ensayo SI1; en el resto de ensayos el coeficiente de permeabilidad fue del orden de 2×10^{-7} m/s con un gradiente hidráulico cercano a 40. La diferencia existente en el valor del coeficiente de permeabilidad es debido a que durante la etapa de saturación bajo $p'=25$ kPa (ensayos SI2, SI3, SA, SM1 y SM2), las muestras experimentan apreciables deformaciones de colapso (máximo $\Delta e \approx -0.09$; referirse a la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6). Mientras que en el ensayo SI1, saturado bajo $p'=9$ kPa, se han detectado hinchamientos muy pequeños ($\Delta e \approx +0.01$). Al finalizar el proceso de saturación por flujo de agua libre entrando a la muestra, la llave de la línea de drenaje con salida a presión atmosférica se cierra, y se conecta al sistema de presión de agua intersticial. En consecuencia, en el borde superior de la muestra se impone una presión de agua intersticial igual a la aplicada por debajo, de 30 kPa ($u_{w1} = u_{w2}$); y la tensión media efectiva, distribuida uniformemente a lo largo de la muestra, es reducida a 5 kPa en el ensayo SI1 y a 10 kPa en los ensayos SI2, SI3, SA, SM1 y SM2.

Una segunda etapa de saturación se efectúa incrementando la presión de agua intersticial a un valor suficientemente alto para disolver todo el aire contenido en los poros de la muestra y eliminar burbujas de aire de las líneas de drenaje y presión de agua, que no fueron eliminados por el flujo de agua libre. El procedimiento consiste en incrementar, gradual y continuamente, las presiones de confinamiento y de agua intersticial a una velocidad de 30 s/kPa, manteniendo constante la diferencia de presiones. La presión de agua intersticial se incrementa hasta 300 kPa, manteniendo la tensión media efectiva constante en 5 kPa para el ensayo SI1 y a 10 kPa en el resto de ensayos. Para juzgar la correcta saturación de la muestra, el valor del coeficiente B de Skempton se evalúa mediante incrementos de 30 kPa. Los valores de B fueron cercanos a 0.92.

Tabla 5.6 Propiedades de las muestras después de la saturación.

Ensayo	e	p'_{pro} kPa	p'_{final} kPa
SI1	0.84	9	5
SI2	0.74	27	10
SI3	0.74	25	10
SA	0.77	25	10
SM1	0.80	28	10
SM2	0.77	27	10

p'_{pro} : Tensión media efectiva promedio al final de la saturación por flujo de agua libre. (asumiendo una distribución lineal de presiones del agua intersticial).

p'_{final} : Tensión media efectiva después de cerrar la llave de la línea de drenaje y conectarla al sistema de presión de agua intersticial, y final de la etapa de saturación.

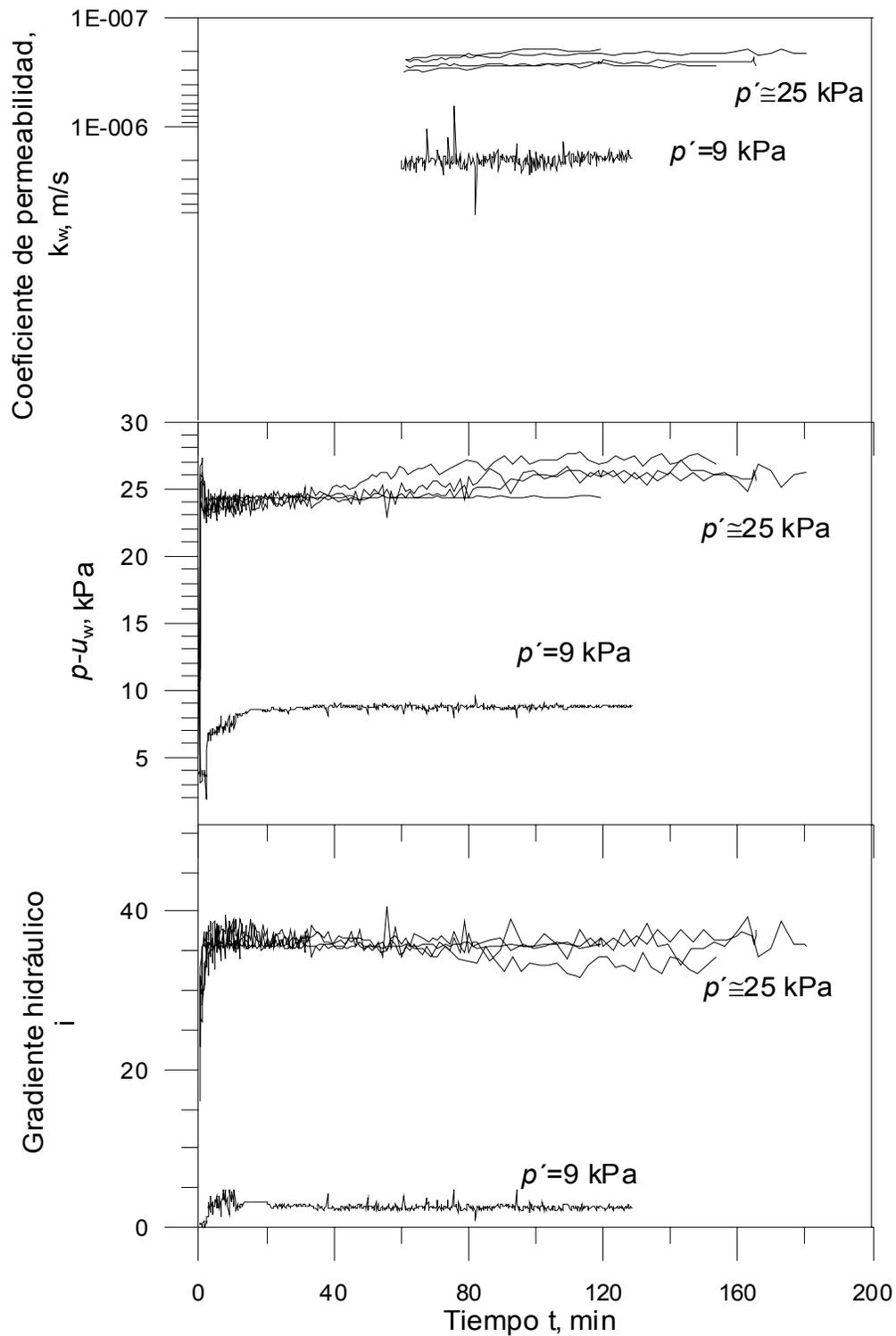


Figura. 5.16 Evolución del coeficiente de permeabilidad, la tensión media total menos presión de agua (tensión efectiva en condición saturada) y el gradiente hidráulico, con el tiempo, en la etapa de saturación de los ensayos triaxiales sobre muestras saturadas.

5.4.3 Trayectorias de tensiones y programa de ensayos triaxiales en muestras saturadas.

Una vez saturada la muestra se realizaron trayectorias de consolidación y compresión triaxial. Para analizar correctamente las trayectorias realizadas, y entender el efecto de la historia de tensiones sobre el comportamiento de las muestras, es importante resaltar que la tensión media máxima aplicada fue de 25 kPa, durante el proceso de saturación por flujo de agua libre. Dicha tensión media es mayor a la tensión media aplicada al inicio de las trayectorias de tensiones sobre muestras saturadas (5 kPa para el ensayo S1 y 10 kPa para los ensayos restantes).

Las trayectorias realizadas son las siguientes:

Trayectoria SI1, trayectoria SI2 y trayectoria SI3 (referirse a la

Tabla 5.4): las muestras se consolidaron ejecutando una rampa de incrementos de presiones bajo condiciones isótropas hasta alcanzar la tensión media máxima prefijada. En la Figura. 5.17 se muestran las trayectorias SI1, SI2 y SI3 en el plano (p' , q). La trayectoria SI1 inició con una presión de confinamiento de 305 kPa y una presión intersticial de agua de 300 kPa, resultando en una tensión media inicial de 5 kPa (referirse al punto de tensión A de la Fig. 4.42), mientras que las trayectorias SI2 y SI3 iniciaron con una presión de confinamiento de 310 kPa y una presión intersticial de agua de 300 kPa, resultando en una tensión media inicial de 10 kPa. Las tensiones medias máximas, prefijadas, fueron de 200, 400 y 600 kPa para los ensayos SI1, SI2 y SI3, respectivamente (referirse a los puntos de tensión B, D y F de la Figura. 5.17). En los tres ensayos, la rotura drenada se impuso en una trayectoria de compresión triaxial, (referirse a los tramos B-C D-E y F-G de Figura. 5.17). Las etapas de consolidación y rotura se realizaron lo suficientemente lentas como para garantizar excesos de presión intersticial de agua (u_w) menores de 10 kPa. En el ensayo SI2 se realiza una trayectoria de descarga isótropa desde $p'=100$ kPa hasta 50 kPa y una recarga hasta 400 kPa antes de efectuar la trayectoria de compresión triaxial.

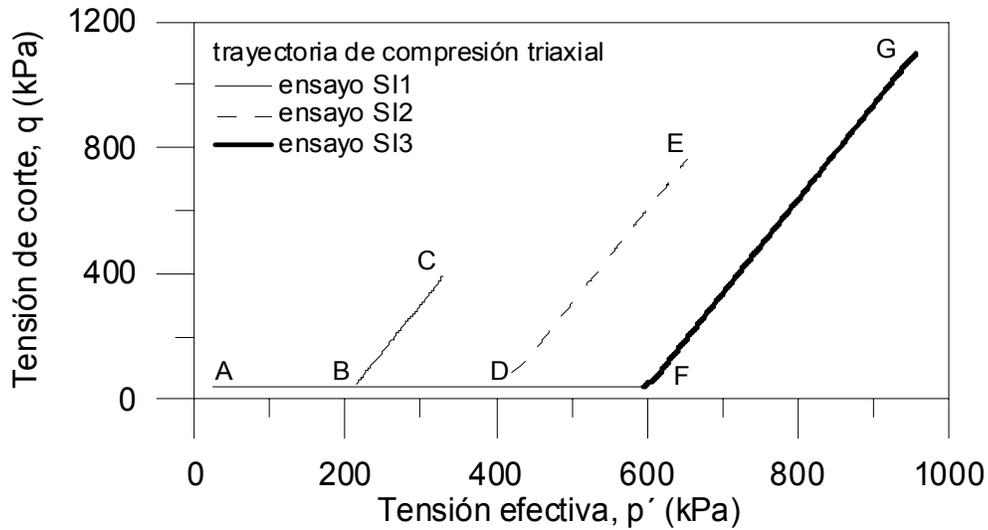


Figura. 5.17 Etapa de compresión isotrópica y etapa de corte, en el espacio $(p'-q)$, para los ensayos SI1, SI2 y SI3.

Trayectoria SA (referirse a la

Tabla 5.4): se comenzó con una presión de confinamiento de 310 kPa y una presión intersticial de agua de 300 kPa, resultando en una tensión media inicial de 10 kPa. La muestras se consolidó ejecutando una rampa de incrementos de presiones bajo una condición de $\eta = q/p' = 0.86$ (o $K = \sigma_r'/\sigma_a' = 0.45$) hasta alcanzar la tensión media máxima especificada de 263 kPa (referirse al punto B de la Figura. 5.18, en el plano (p', q)).

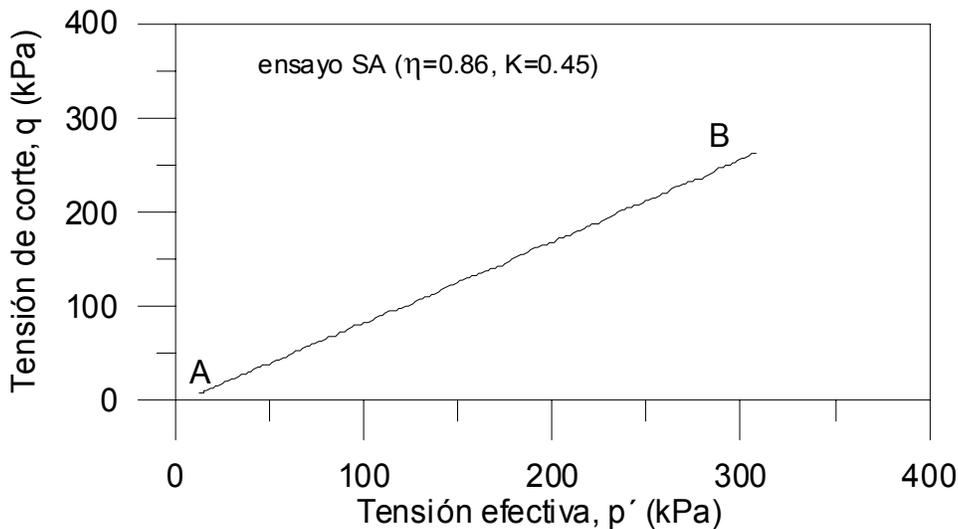


Figura. 5.18 Etapa de compresión anisótropa, en el espacio $(p'-q)$, para el ensayo SA.

Trayectoria SM1 (referirse a la

Tabla 5.4): En la Figura. 5.19 se muestra la Trayectoria SM1 en el plano (p' , q). Se inició con una presión de confinamiento de 310 kPa y una presión intersticial de agua de 300 kPa, resultando en una tensión media inicial de 10 kPa (referirse al punto A de la Figura. 5.19). La muestra se consolidó ejecutando una rampa de incrementos de presiones bajo una condición de $\eta = q/p' = 0.36$ (o $K = \sigma_r'/\sigma_a' = 0.70$) hasta alcanzar la tensión media de 200 kPa (referirse al punto B de la Figura. 5.19). Después se siguió una trayectoria de descarga anisótropa bajo la misma condición de $\eta = q/p' = 0.36$ (o $K = \sigma_r'/\sigma_a' = 0.70$) hasta alcanzar la tensión media de 100 kPa (referirse al punto C). Posteriormente, la muestra se consolidó bajo condición isotrópica hasta alcanzar la tensión media de 300 kPa (referirse al punto D). Seguidamente, la muestra se descargó bajo condición isotrópica hasta alcanzar de nuevo la tensión media de 100 kPa (referirse al punto C), y finalmente se lleva a rotura drenada por medio de una trayectoria de compresión triaxial (referirse al tramo C-E).

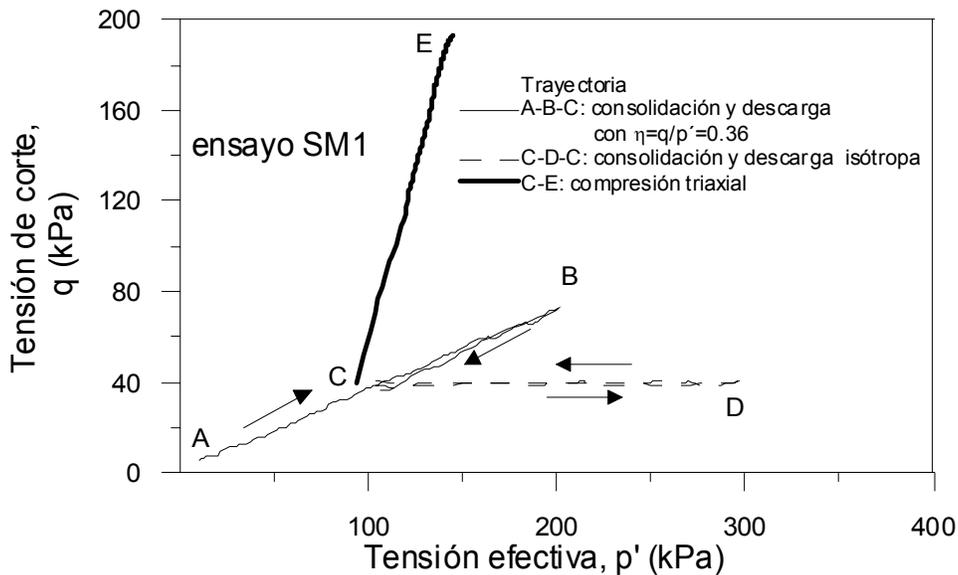


Figura. 5.19 Etapas de compresión isotrópica y anisótropa, y etapa de corte, en el espacio (p' - q), para el ensayo SM1.

Trayectoria SM2 (referirse a la

Tabla 5.4): En la Figura. 5.20 se muestra la Trayectoria SM2 en el plano (p' , q). El ensayo se inició con una presión de confinamiento de 310 kPa y una presión intersticial de agua de 300 kPa, resultando en una tensión media inicial de 10 kPa (referirse al punto A de la Figura. 5.20). La muestra se consolidó bajo condición isotrópica hasta alcanzar la tensión media de 100 kPa (referirse al punto B de la Figura. 5.20), e inmediatamente se siguió una trayectoria de descarga bajo condición isotrópica hasta alcanzar la tensión media de 50 kPa (referirse al punto C). Posteriormente se realiza otra trayectoria carga bajo una condición anisótropa siguiendo los puntos de tensión: $p'=50$ kPa, $q=5$ kPa, al $p'=209$ kPa, $q=187$ kPa; (referirse al tramo de carga C-D).

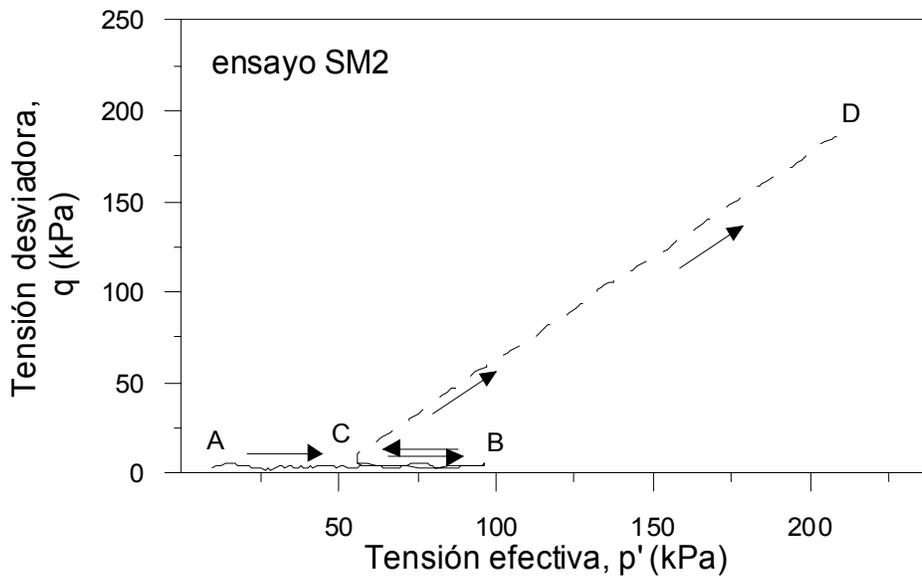


Figura. 5.20 Etapas de compresión isotrópica y anisótropa, y etapa de corte, en el espacio (p' - q), para el ensayo SM2.