

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1. INTRODUCCION

En este capítulo se incluyen todos los apartados relacionados con los ensayos de laboratorio llevados a cabo (identificación de los suelos, programa y descripción de los ensayos, resultados obtenidos y conclusiones).

El objetivo fundamental planteado para la realización de estos ensayos ha sido reproducir respuestas características del suelo en estado no saturado cuando es sometido a trayectorias tensionales generales, de forma que se obtenga información sobre el tipo de modelo más adecuado para describir su comportamiento. El programa de ensayos de laboratorio previsto incluye, en consecuencia, las diferentes trayectorias de tensiones a seguir en cada uno de ellos.

Para la realización de los ensayos se han utilizado dos tipos de suelos, un caolín de baja plasticidad y una mezcla de este caolín con una arcilla plástica, expansiva. Con el primero de ellos, ya utilizado en otros trabajos (Lloret (1982)), se han realizado la mayor parte de los ensayos, estudiando los comportamientos más generales del suelo (dependencia del estado final de las muestras con la trayectoria tensional,

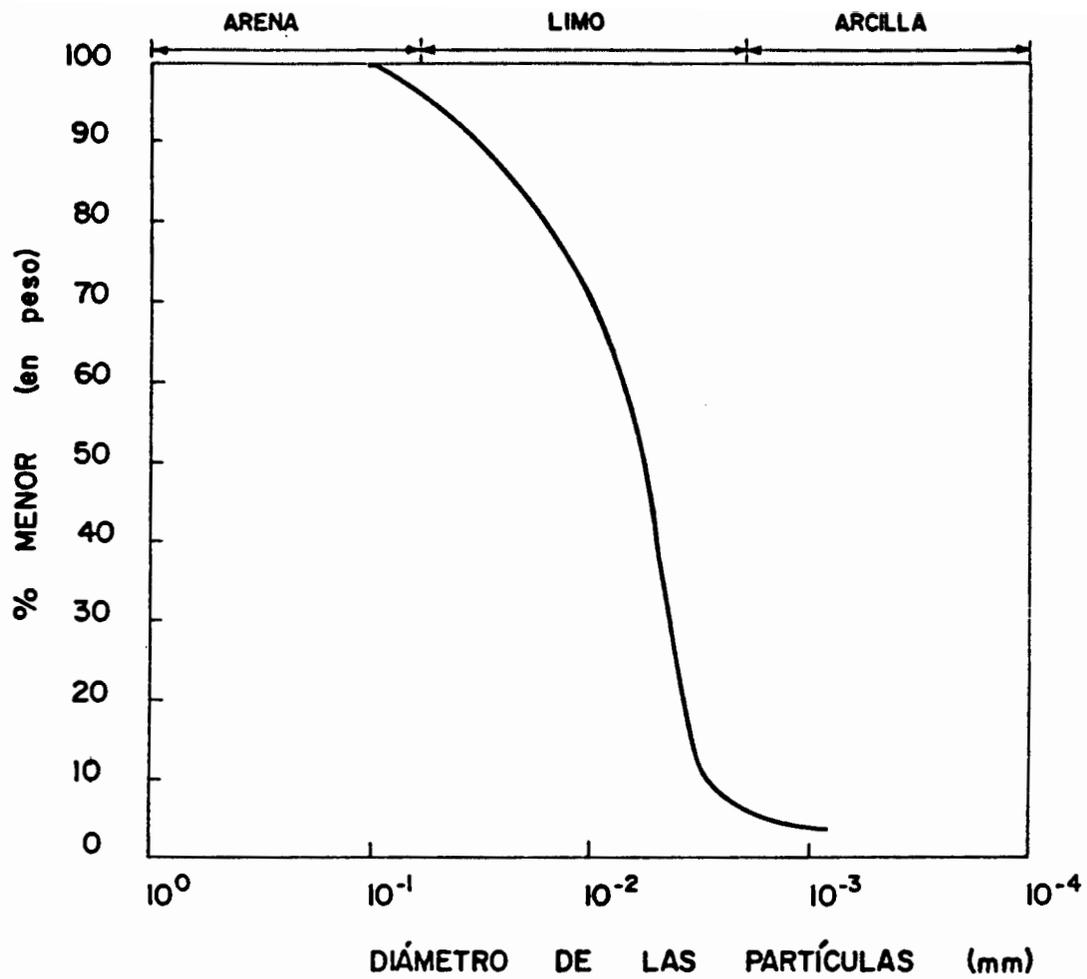


Figura 72. Curva granulométrica del caolín (Lloret (1982)).

colapso, resistencia al corte, etc.). El segundo ha servido para obtener alguna respuesta específica de suelos expansivos. Con estos dos tipos de muestras se ha pretendido cubrir buena parte de los comportamientos característicos de suelos no saturados.

4.2. CARACTERIZACION DE LOS SUELOS EMPLEADOS

En los siguientes apartados se caracterizan los dos suelos empleados (caolín y arcilla), llegándose a mayor detalle con el primero de ellos por haber sido el habitualmente ensayado.

4.2.1. CAOLIN

Las propiedades básicas de este caolín comercial son las siguientes:

a) Granulometría. Se trata de un suelo de grano fino cuyas partículas pasan en más del 95% por el tamiz 200 de la serie A.S.T.M.. Por ello la granulometría obtenida por tamizado no proporciona prácticamente información. La figura 72 muestra los resultados procedentes de Lloret (1982) tras realizar un ensayo de sedimentación convencional.

Con la remesa de caolín utilizada en los ensayos de esta tesis se ha obtenido también dicha curva, haciendo uso en este caso de un granulómetro láser con un sistema de dosificación y dispersión de las partículas Rodos y un espectrómetro de difracción Helos, acoplados a un equipo de interpretación y salida de resultados. Es posible con este equipo realizar esta determinación tanto por vía húmeda como por vía seca, suponiéndose al procesar los datos, como en el caso del ensayo de sedimentación, que las partículas son esféricas, por lo que los resultados proporcionados por ambos procedimientos son comparables.

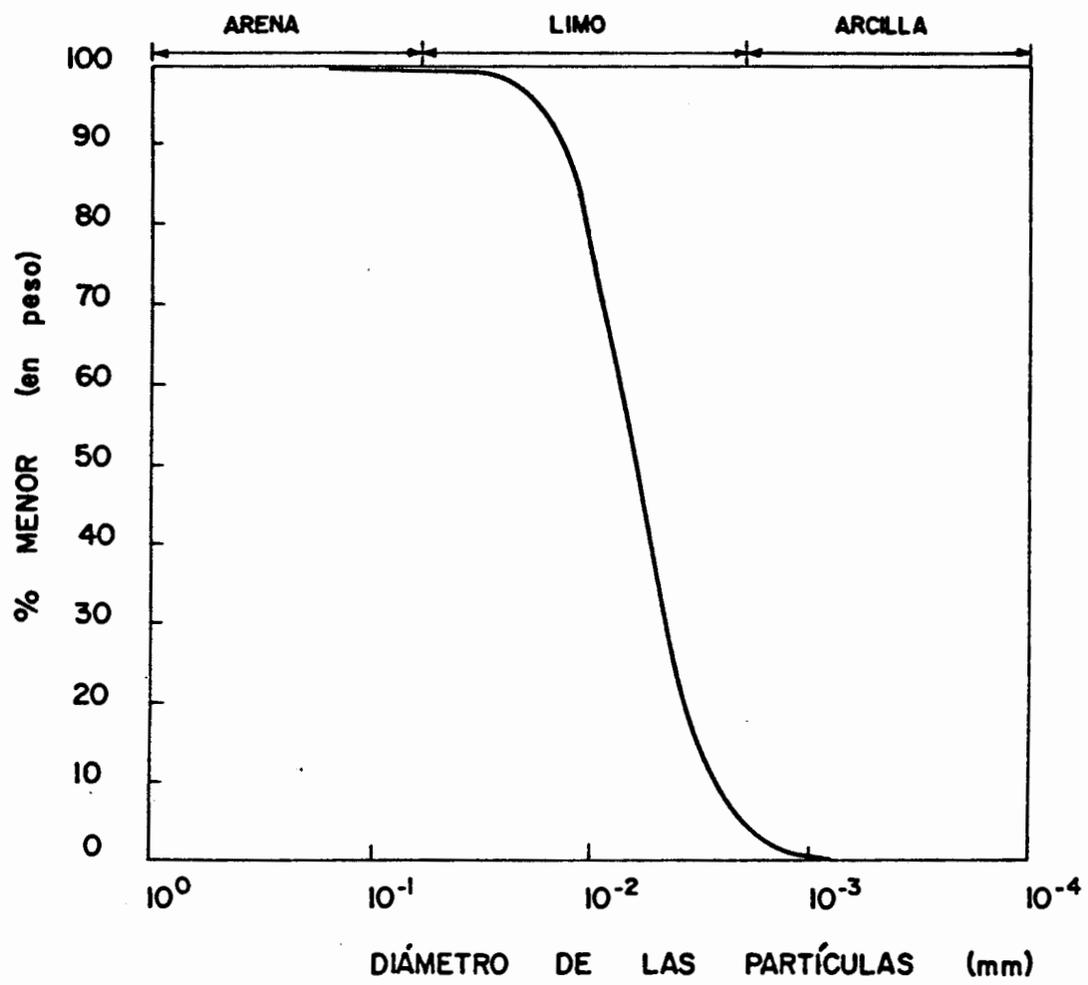


Figura 73. Curva granulométrica del caolín.

Las figuras 73 y 74 muestran, respectivamente, la curva granulométrica y la distribución de los tamaños de las partículas obtenidas tras realizar el ensayo por vía seca. Como se observa en la figura 73, el resultado es muy similar al proporcionado por Lloret (1982), por lo que el material suministrado puede considerarse bastante uniforme en el tiempo.

De acuerdo con estas curvas el coeficiente de uniformidad del suelo es del orden de 2,70 y el coeficiente de curvatura del orden de 1,10, lo cual indica que se trata de un suelo con granulometría uniforme. Las fracciones arcillosa y arenosa son muy pequeñas (respectivamente 0% y 4,4%) por lo que es un suelo limoso.

b) Peso específico de las partículas. Se ha obtenido 2,64 g/cc.

c) Análisis químico y físico. La tabla 19 muestra las principales características físicas y químicas del suelo, proporcionadas por el suministrador.

d) Minerales componentes. Se ha realizado un ensayo de difracción de rayos X para determinar los principales minerales contenidos por el caolín (figura 75). De acuerdo con sus resultados está fundamentalmente compuesto por caolinita y cuarzo, algo de illita y, aún en menor proporción, algunos feldespatos.

e) Límites de Atterberg. Se han determinado los límites líquido y plástico, habiéndose obtenido respectivamente 38,7% y 26,9% (índice de plasticidad 11,8%).

f) Clasificación de Casagrande. De acuerdo con los resultados obtenidos se trata de un limo inorgánico de baja plasticidad tipo ML.

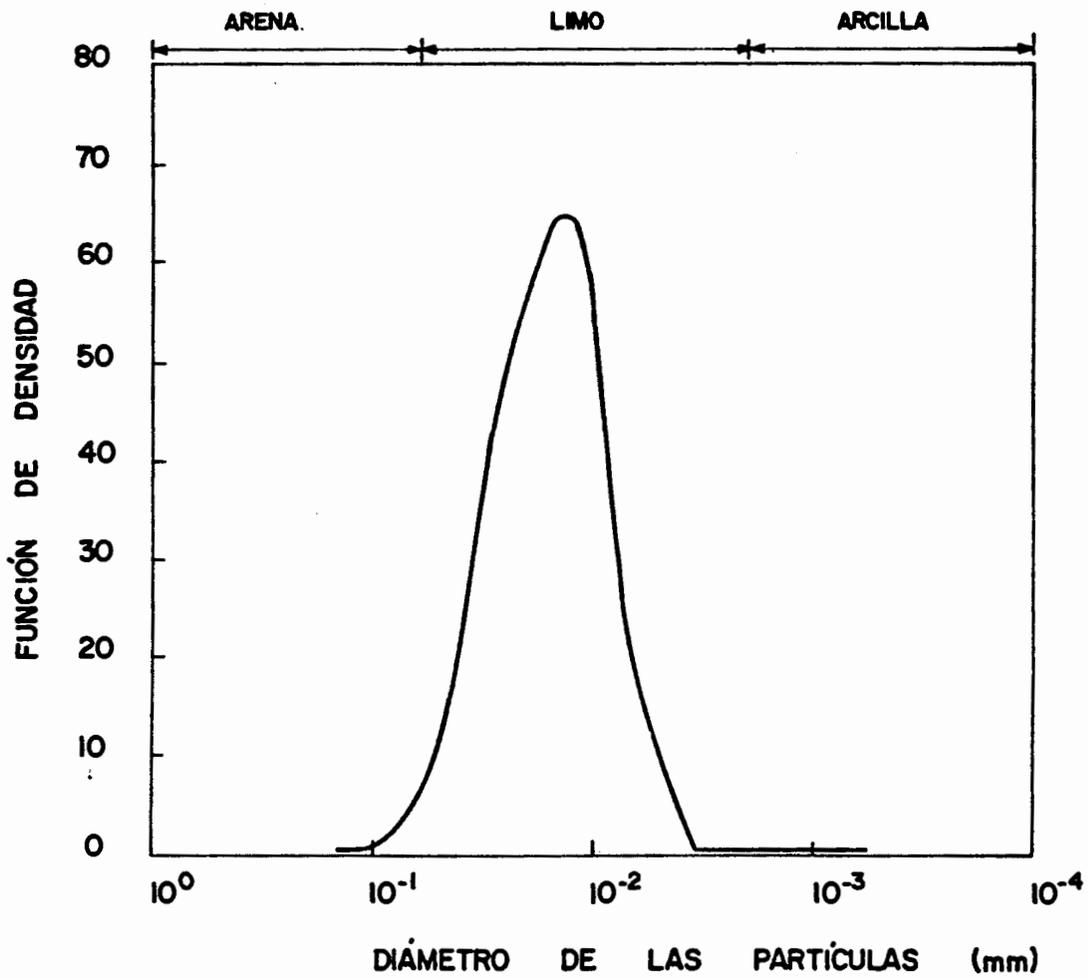


Figura 74. Distribución de los tamaños de las partículas del caolín.

ANALISIS QUIMICO

SiO ₂	58,31 ‰
Al ₂ O ₃	28,92 ‰
Fe ₂ O ₃	0,57 ‰
TiO ₂	0,26 ‰
CaO	0,12 ‰
MgO	0,16 ‰
K ₂ O	1,73 ‰
Na ₂ O	0,05 ‰
Pérdida por calcinación	9,30 ‰

CARACTERISTICAS FISICAS

Porcentaje de humedad al ensacado	< 1,0 ‰
pH en solución saturada	9,35
Absorción de DOP	45-47 ‰
Absorción de aceite	40-41 ‰
Densidad real	2,6 g/cc
Densidad aparente (comprimida)	1,1 g/cc
(no comprimida)	0,6 g/cc
Blancura photovolt - FMX filtro ámbar	80,2
FMY filtro verde	78,8
FMZ filtro azul	72,0

Tabla 19. Características químicas y físicas del caolín.

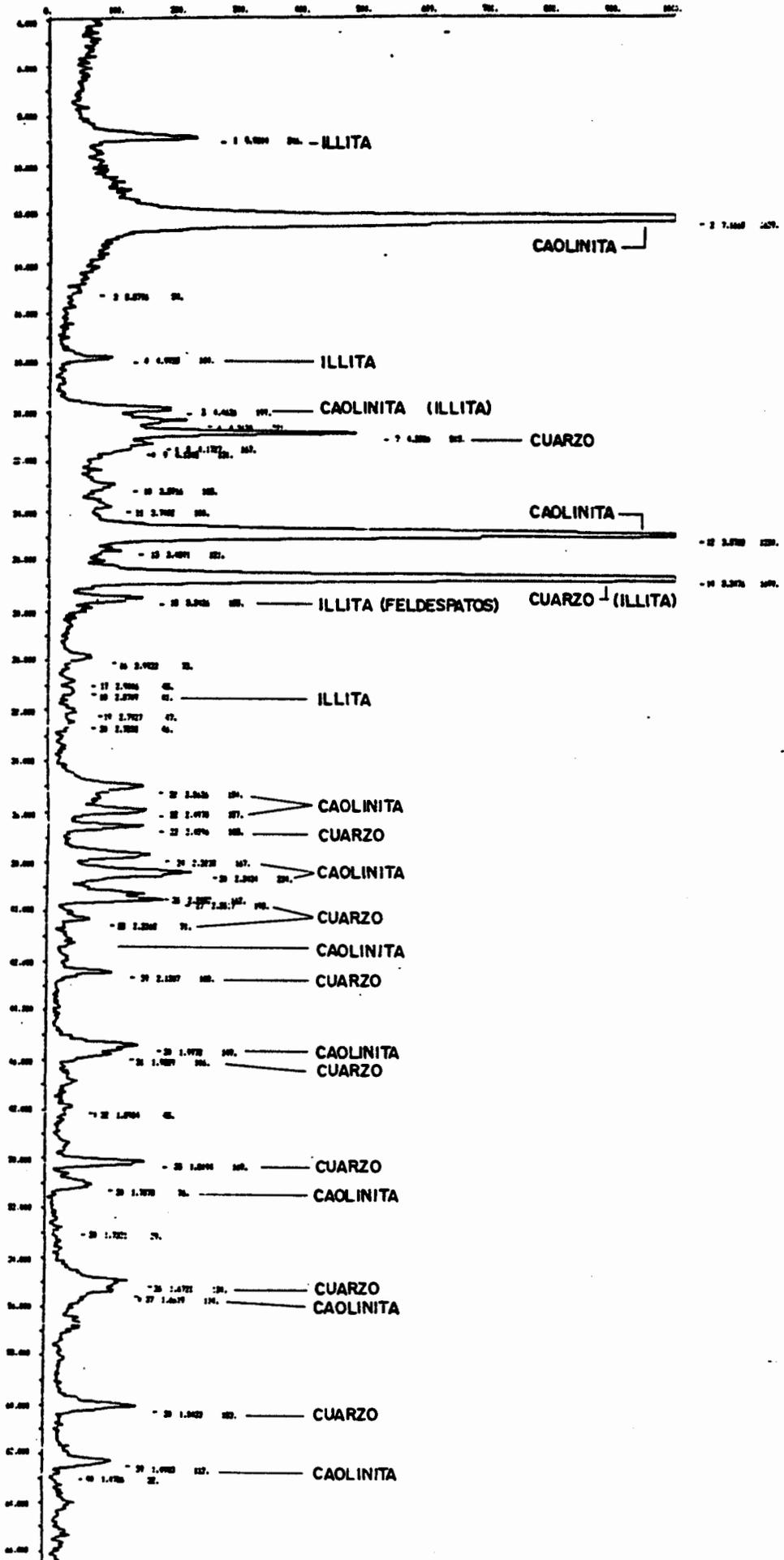


Figura 75. Resultados del ensayo de difracción de rayos X del caolín.

g) Características de consolidación. Para su obtención se ha realizado un ensayo edométrico convencional, con las mismas condiciones iniciales del caolín que después se han empleado en los ensayos triaxiales ($e=0,9$ y $w=34\%$). Los valores de c_v , del módulo de deformación y de la permeabilidad resultantes han oscilado entre $2,72 \cdot 10^{-7}$ m²/seg y $6,53 \cdot 10^{-7}$ m²/seg el primero, 0,435 MPa y 10,006 MPa el segundo y $6,26 \cdot 10^{-9}$ m/seg y $6,53 \cdot 10^{-10}$ m/seg la tercera, respectivamente para presiones verticales de 0,01 MPa y 0,8 MPa. La figura 76 muestra la curva de consolidación obtenida, de la que se deducen unos parámetros $C_c=0,20$ y $C_\alpha=0,028$. Estos resultados se pueden considerar normales para el tipo de suelo ensayado.

h) Permeabilidad al agua. Lloret (1982) obtiene experimentalmente la relación entre la permeabilidad al agua (k_v) del caolín saturado y su índice de poros (e), proponiendo la siguiente expresión:

$$k_v = 9,6828 \cdot 10^{-13} \cdot (18864)^e$$

donde k_v está expresada en m/seg. Los valores de k_v resultantes de esta fórmula coinciden sensiblemente con los observados en el ensayo edométrico realizado.

i) Permeabilidad intrínseca al aire. Lloret (1982), siguiendo un procedimiento análogo al utilizado por Yoshimi y Osterberg (1963), obtiene asimismo experimentalmente la siguiente relación entre la permeabilidad intrínseca al aire del caolín (k_a), su índice de poros (e) y su grado de saturación (S_r):

$$k_a = 1,86 \cdot 10^{-13} \cdot (e \cdot (1 - S_r))^{2,85}$$

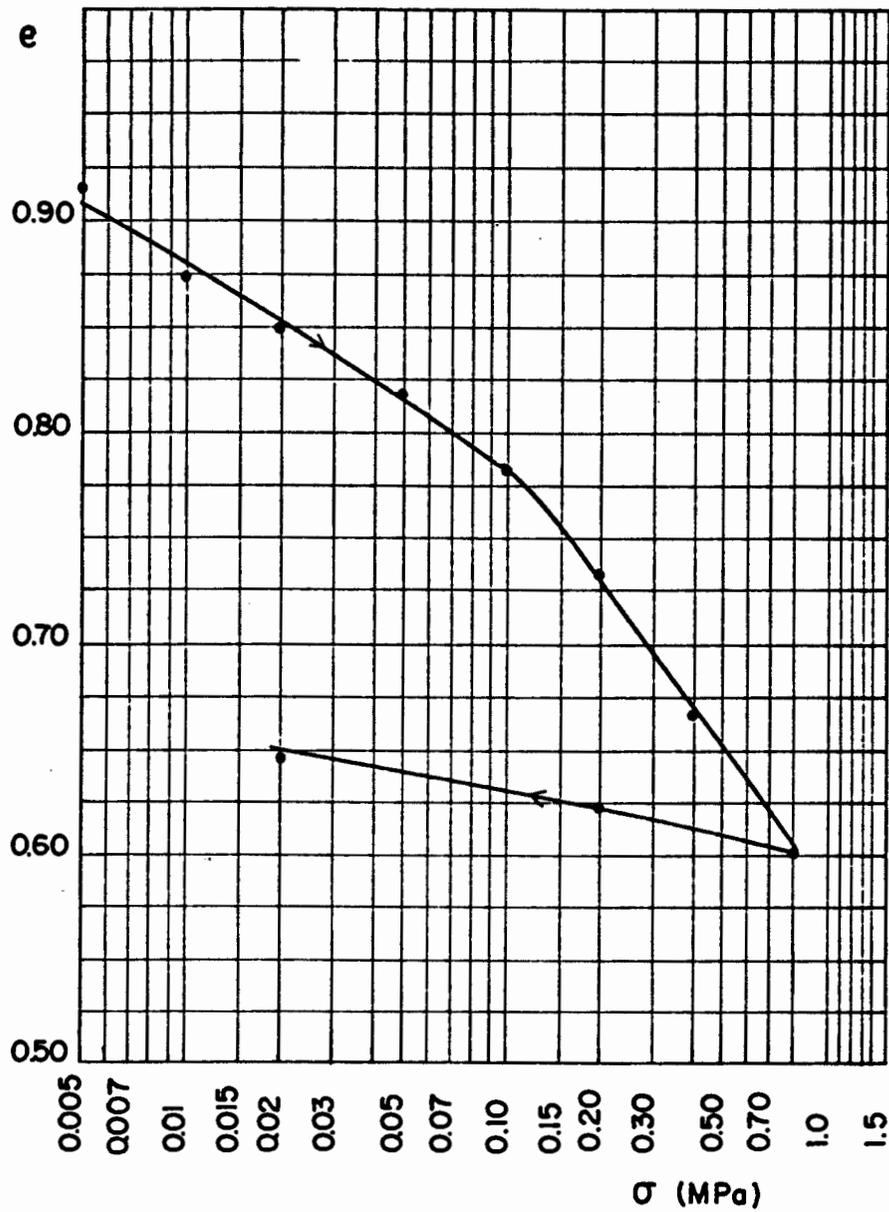


Figura 76. Curva de consolidación del caolín a partir de un estado inicial con un índice de poros de 0,9 y una humedad del 34 %.

donde k_a está expresada en m^2 .

j) Superficies de estado. Este mismo autor obtiene y expresa analíticamente las superficies de estado del caolín, tras ensayarlo en una célula edométrica con succión controlada, con las siguientes condiciones iniciales de las muestras: $e=0,96$ y $w=19,62\%$ ($S_r=54,27\%$). Las expresiones propuestas son:

$$e = 1,0141 - 5,5798 \cdot 10^{-7} \cdot (\sigma - p_a) - 1,5852 \cdot 10^{-2} \cdot \log(p_a - p_v) + 7,4379 \cdot 10^{-8} \cdot (\sigma - p_a) \cdot \log(p_a - p_v)$$

$$S_r = 1,9344 - 9,8872 \cdot 10^{-8} \cdot (\sigma - p_a) - 0,2793 \cdot \log(p_a - p_v) + 3,4277 \cdot 10^{-8} \cdot (\sigma - p_a) \cdot \log(p_a - p_v)$$

donde σ es la presión vertical. La figura 77 presenta gráficamente estas superficies de estado.

4.2.2. ARCILLA

Las propiedades básicas de esta arcilla, comercializada para usos industriales, son las siguientes:

a) Granulometría. Se trata de un suelo de grano fino en el que el 100% pasa por el tamiz 200 de la serie A.S.T.M. y el 80% es fracción arcillosa. La figura 78 muestra su curva granulométrica tras realizar un ensayo convencional de sedimentación.

b) Peso específico de las partículas. Se ha obtenido 2,79 g/cc.

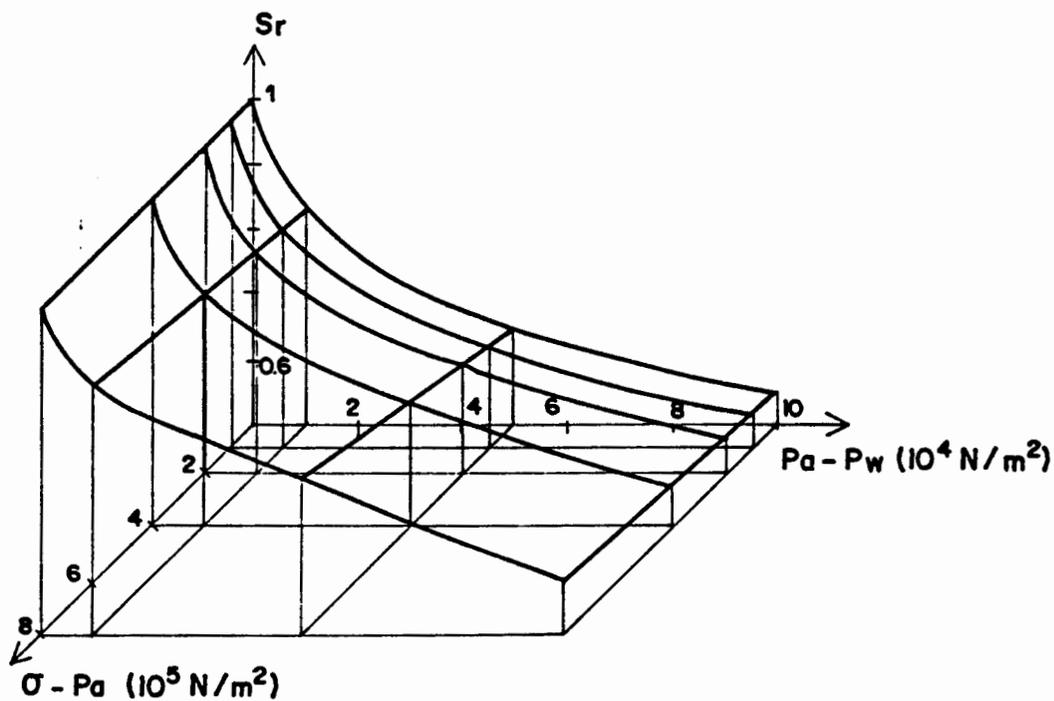
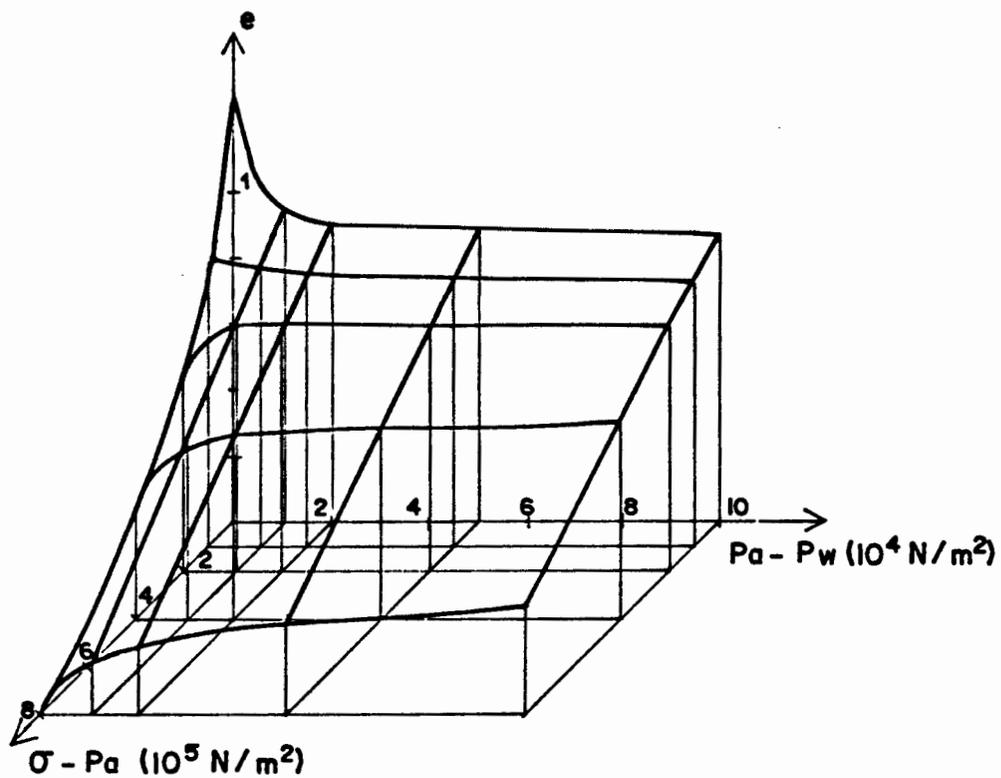


Figura 77. Superficies de estado del caolín para un índice de poros inicial de 0,96 y un grado de saturación inicial del 54,27 % (Lloret (1982)).

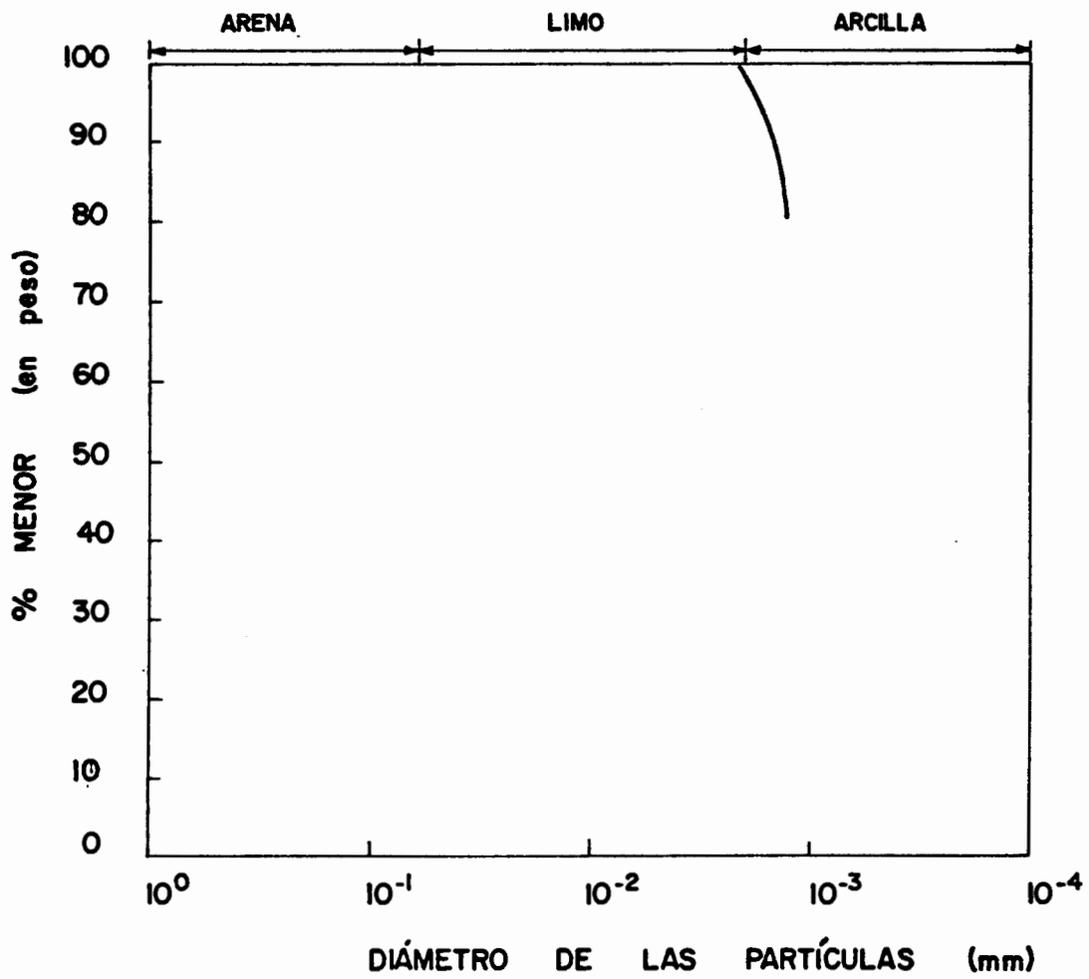


Figura 78. Curva granulométrica de la arcilla.

c) **Minerales componentes.** Tras realizar un ensayo de defracción de rayos X (figura 79), se ha comprobado que está compuesta fundamentalmente por illita.

d) **Límites de Atterberg.** Se han determinado los límites líquido y plástico, habiéndose obtenido respectivamente 312% y 47% (índice de plasticidad 265%).

e) **Clasificación de Casagrande.** De acuerdo con los resultados obtenidos se trata de una arcilla inorgánica de alta plasticidad tipo CH.

f) **Expansividad.** Para determinar de forma aproximada la expansividad de este suelo se han aplicado varios de los métodos indirectos citados en el capítulo 2 de esta tesis (por ejemplo Chen (1965), Holtz (1959), Skempton (1953), etc.) obteniendo en todos ellos un grado de hinchamiento muy alto. Adicionalmente se ha realizado un ensayo Lambe partiendo de la muestra seca. El resultado obtenido tras inundar durante 2 horas la muestra indicaba una expansividad tan sólo marginal. La impermeabilidad de este suelo y el incremento continuado del hinchamiento tras esas dos horas aconsejaron prolongar el ensayo hasta su estabilización. Esto ocurrió a los dos días, obteniéndose entonces una expansividad crítica. Como el único fin de estas determinaciones era conocer aproximadamente el grado de hinchamiento del suelo, no se realizaron más ensayos.

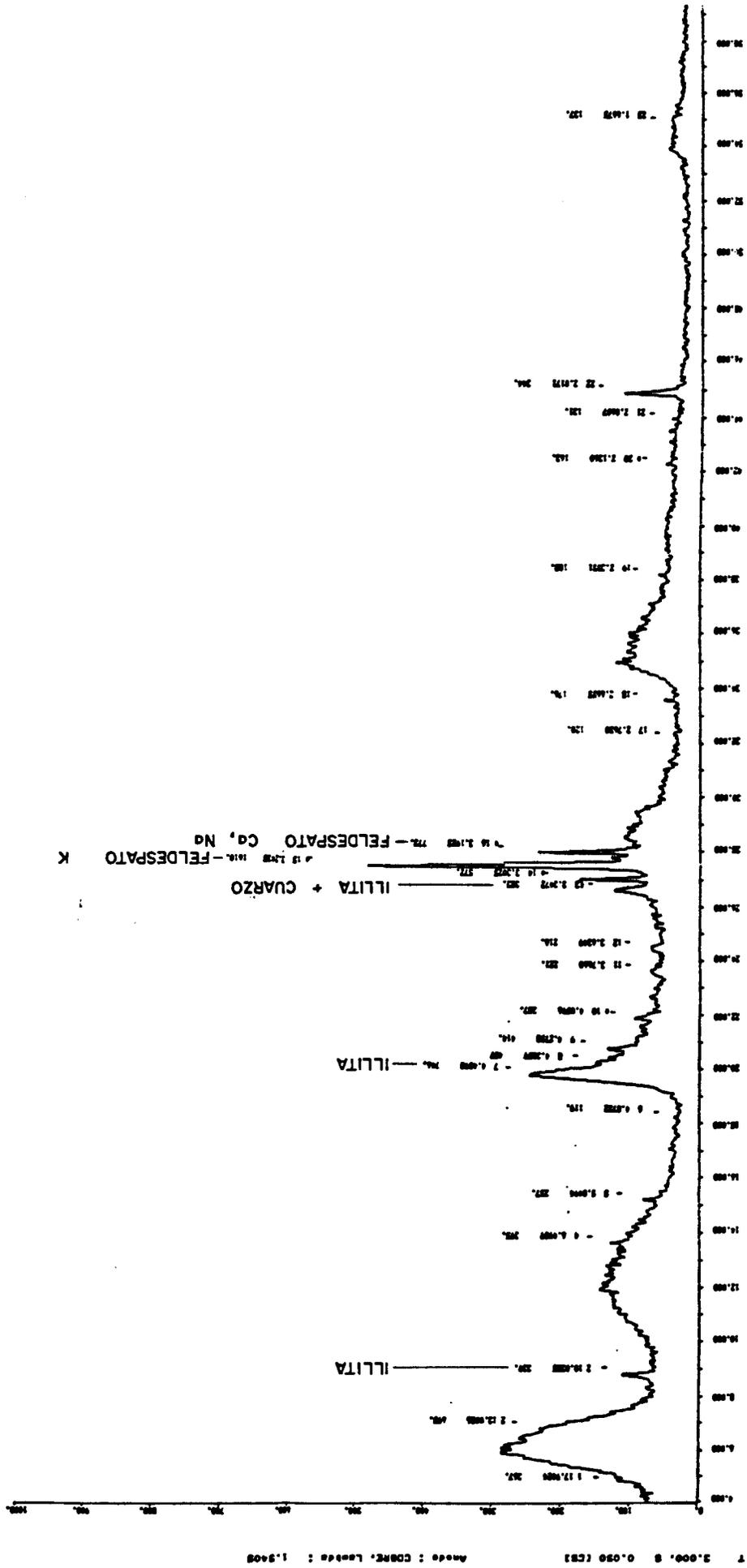


Figura 79. Resultados del ensayo de difracción de rayos X de la arcilla.

4.3. FABRICACION DE LAS PROBETAS Y PUESTA EN MARCHA DE LOS ENSAYOS

4.3.1. FABRICACION DE LAS PROBETAS

En todos los ensayos realizados con el caolín se partió del mismo estado inicial de las muestras, haciendo de esta forma comparables los resultados obtenidos. Por lo que respecta al ensayo realizado con la mezcla de caolín y arcilla, se partió de un estado inicial diferente al del caolín solo. Para determinar estos estados iniciales se tuvieron en cuenta las trayectorias tensionales de mayor interés a seguir:

a) Caolín. El mejor conocimiento del comportamiento de suelos poco plásticos en lo que respecta a su respuesta en trayectorias tensionales con succión decreciente (por ejemplo la existencia de las superficies de estado, como describen Matyas y Radhakrishna (1968) o Barden et al (1969)) y específicamente utilizando este caolín (Lloret (1982)) hicieron que se optase por comenzar los ensayos con succiones bajas, e incrementarlas posteriormente observando la respuesta del suelo.

Por otro lado interesaban muestras con índices de poros iniciales altos y suficientemente compresibles, de forma que durante los ensayos se pudiese comprobar con mayor claridad su comportamiento.

Por estas razones se decidió utilizar un grado de saturación elevado cercano a 1 y un índice de poros asimismo alto (0,9) similar al empleado por Lloret (1982) (0,96).

Fijado el volumen de la probeta cilíndrica (altura 7,62 cm, radio 1,905 cm y volumen 86,875 cc) se utilizaron para su fabricación cantidades de agua y caolín ajustadas para obtener un grado de saturación teórico de 1 y un índice de poros 0,9:

- . peso de agua: 41,14 g
- . peso de caolín: 120,74 g

Con esta composición las propiedades asimismo teóricas de la probeta eran:

- . $e = 0,9$
- . $S_r = 1$
- . $w = 34,07\%$

La dificultad práctica para obtener un grado de saturación 1 si no se parte de humedades suficientemente altas hace ya suponer que este parámetro será inferior a dicho valor en las muestras utilizadas. Por ello posteriormente a su fabricación se comprobó las propiedades realmente obtenidas, como más adelante se indica.

b) Caolín+arcilla. En este caso interesa seguir trayectorias con succión decreciente para comprobar el comportamiento expansivo del suelo. Por esta razón se fijaron un grado de saturación y un índice de poros inferiores a los del caolín solo, de forma que el hinchamiento fuese más apreciable.

Para su fabricación se mezclaron caolín y arcilla al 50% en peso y se fijó un grado de saturación de 0,65 y un índice de poros de 0,7. Las cantidades utilizadas de cada material fueron:

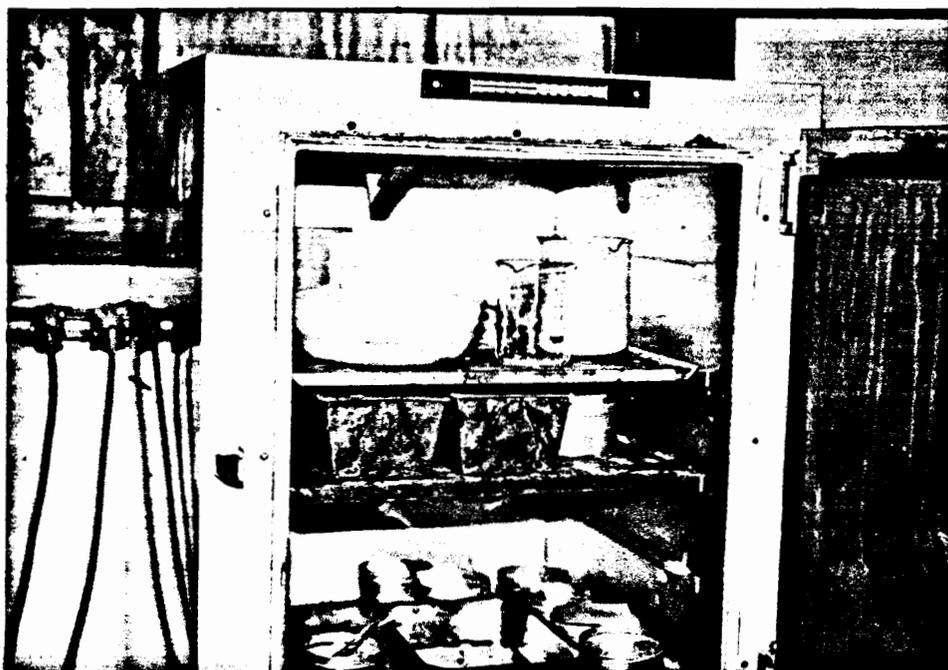


Figura 80a. Deseccación inicial del caolín en estufa.



Figura 80b. Enfriamiento del caolín en una campana estanca.

- . peso de agua: 23,25 g
- . peso de caolín: 69,32 g
- . peso de arcilla: 69,32 g

Con esta composición las propiedades teóricas obtenidas eran:

- . $e = 0,7$
- . $S_r = 0,65$
- . $w = 16,77\%$

Una vez determinadas estas proporciones para el caolín y para el caolín+arcilla, se siguió con ambos suelos el procedimiento a continuación señalado para fabricar las probetas:

- las muestras de suelo se mantenían previamente al menos durante 24 horas a 105° C para ser totalmente desecadas, siendo posteriormente dispuestas en una campana estanca con cloruro cálcico durante 24 horas más para que se enfriasen sin absorber humedad (figuras 80a y 80b).
- posteriormente se pesaban las cantidades adecuadas de suelo y agua. Los pesos utilizados de cada material eran los anteriormente indicados incrementados en un 5%, para tener en cuenta el material no aprovechable adherido al recipiente de mezclado empleado posteriormente (figuras 80c y 80d).
- los diferentes componentes se mezclaban y amasaban hasta su completa homogeneidad (figura 80e).
- la mezcla así obtenida era introducida en un molde de metacrilato con las dimensiones adecuadas de las probetas, para ser a continuación compactada en tres capas de igual espesor con una varilla metálica terminada en un taco cilíndrico de teflón (figura 80f).



Figura 80c. Obtención de la cantidad de caolín correspondiente a cada probeta.



Figura 80d. Obtención de la cantidad de agua correspondiente a cada probeta.



Figura 80e. Amasado del caolín y del agua hasta su completa homogeneidad.

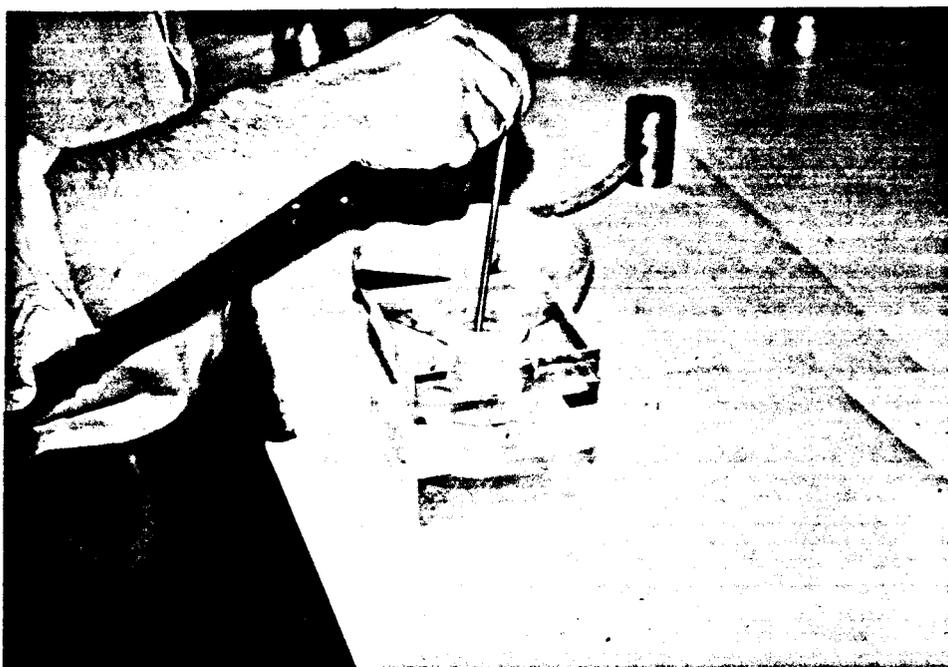


Figura 80f. Compactación de la mezcla de caolín y agua.

- una vez compactada y enrasada la mezcla se extraía la probeta del molde de metacrilato y se le colocaba exteriormente una membrana de aislamiento para su disposición posterior en la célula triaxial (figuras 80g, 80h y 80i).

Se tuvo especial precaución en ejecutar las distintas probetas de caolín de la misma forma para asegurar que su estado inicial fuese en todos los ensayos constante. Con varias de dichas probetas se obtuvo su estado real tras ser fabricadas, calculando, por secado, el peso de agua y de las partículas sólidas contenidas, y conociendo su volumen (86,875 cc). Los valores resultantes fueron muy uniformes, adoptándose finalmente los siguientes:

- . $S_r = 0,92$
- . $e = 0,978$
- . $w = 33,94 \%$

Como se observa, si bien la humedad obtenida es la fijada en los cálculos, queda aire sin expulsar durante el proceso de ejecución, de forma que aumenta el índice de poros y se reduce el grado de saturación.

Con las probetas de caolín se estudió asimismo la uniformidad obtenida a lo largo de su altura. Para ello se seccionaron varias de ellas en rebanadas calculándose en cada una su humedad por secado. Aunque en general se observó una humedad algo superior en el centro que en los extremos de la muestra, las variaciones fueron pequeñas (menores que el 0,5%).



Figura 80g. Obtención de la probeta a ensayar.

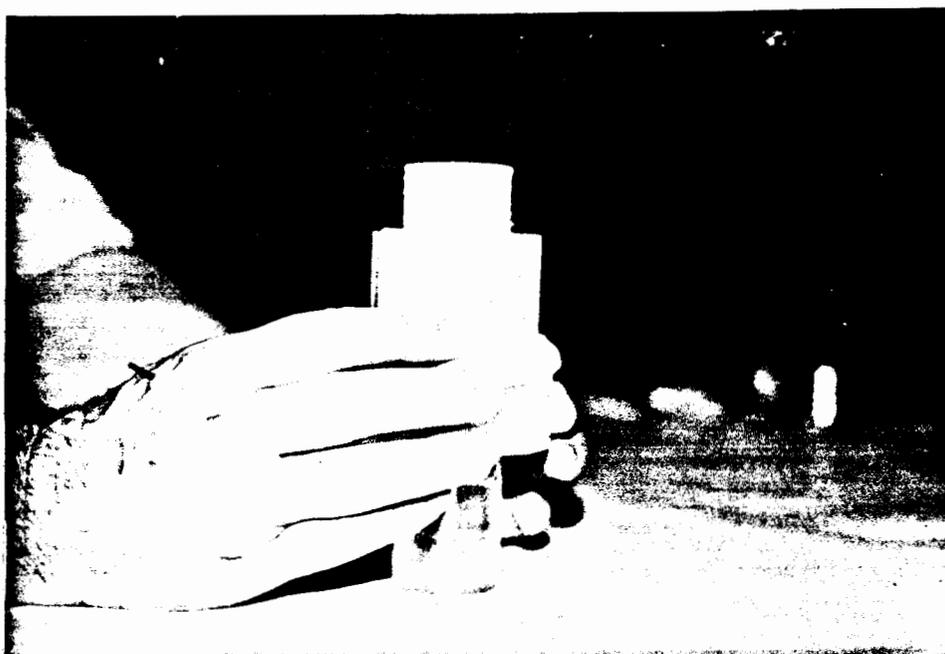


Figura 80h. Obtención de la probeta a ensayar.

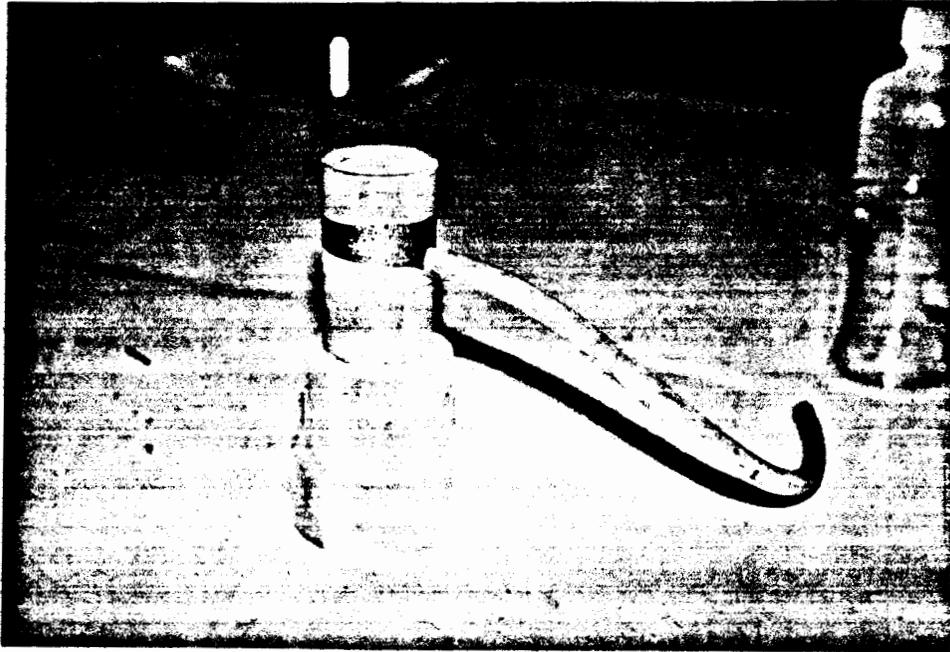


Figura 801. Colocación de una membrana exterior de aislamiento a la probeta.

4.3.2. PUESTA EN MARCHA DE LOS ENSAYOS

Una vez fabricada cada probeta se procedía a la puesta en marcha del ensayo correspondiente. Los pasos seguidos se enumeran a continuación:

- colocación de la base de metacrilato con la piedra porosa de alto valor de entrada de aire saturada de agua, ajustando dicha base al pie del triaxial mediante seis tornillos (figura 80j).
- colocación de la probeta y de la parte inferior del cilindro que se apoya encima de ella (figura 80k). Como se ha indicado en el capítulo anterior este cilindro está compuesto en su parte inferior por material poroso que cumple también la función de uniformizar la presión de aire en la sección superior de la probeta.
- ajuste del cilindro de metacrilato que rodea a la muestra y vertido del mercurio en su interior (figura 80l).
- colocación del flotador, de la parte superior del cilindro apoyado en la muestra, que conecta con el conducto de presión de aire, y de los transductores de desplazamiento sumergibles (figura 80m). La división del cilindro superior a la muestra en dos partes permite colocar el flotador sin necesidad de manipular la conexión con el sistema de presión de aire, asegurando así la estanqueidad de esta conexión.
- cierre de la célula triaxial con el cilindro exterior de metacrilato reforzado con abrazaderas, la base superior con el transductor de carga y las 6 barras de unión con la base inferior (figura 80n).

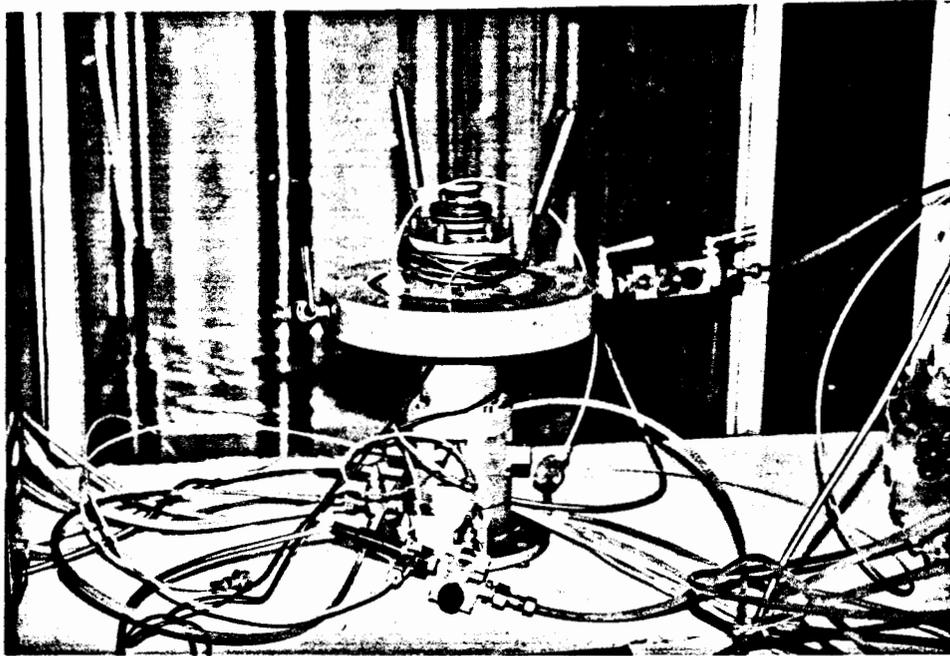


Figura 80j. Colocación de la piedra porosa de alto valor de entrada de aire en la base de la célula triaxial.

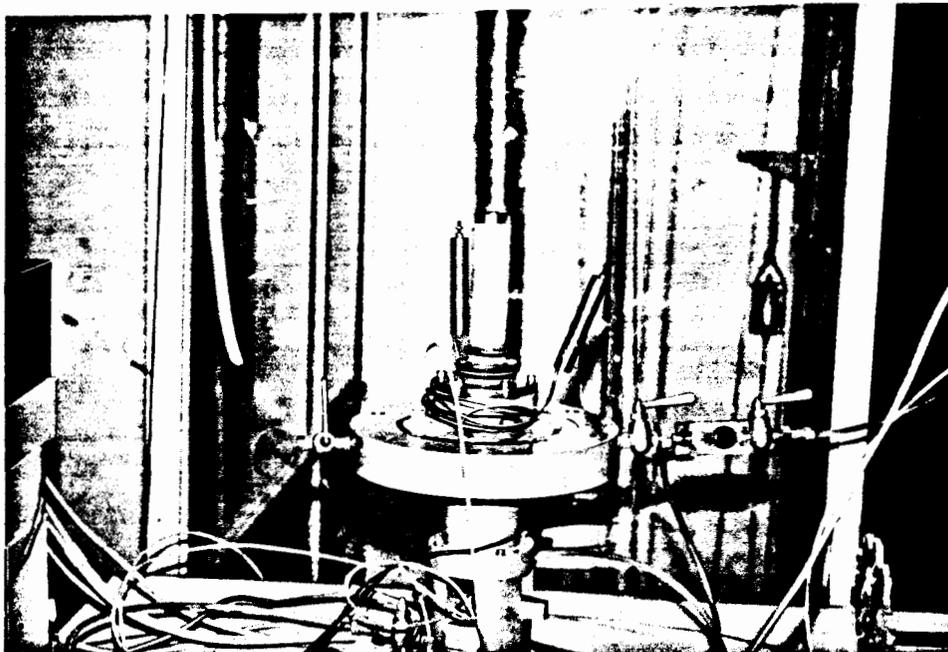


Figura 80k. Colocación de la probeta y del cilindro superior apoyado en ella.

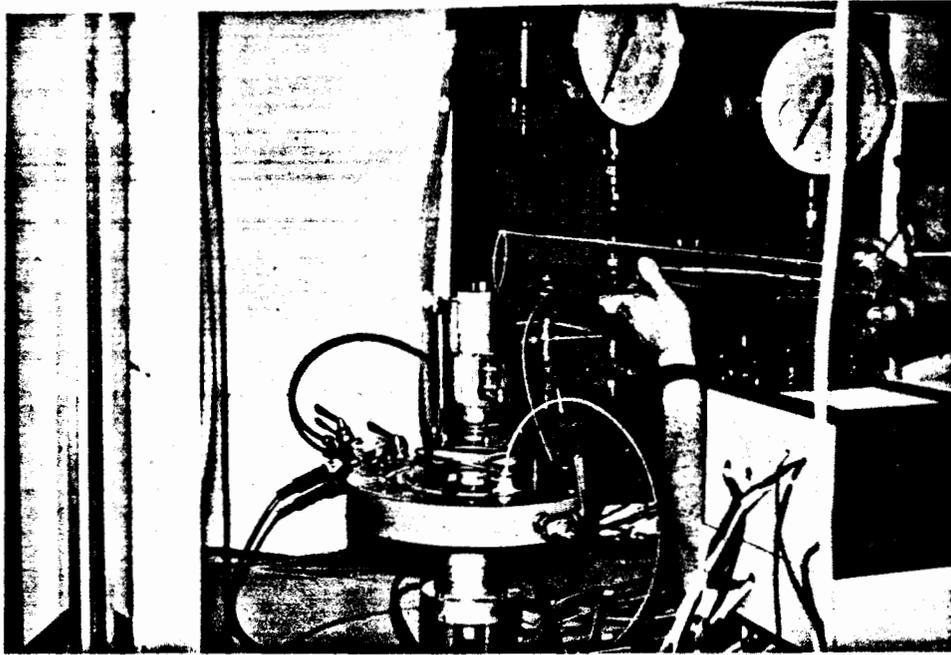


Figura 80l. Colocación del cilindro hueco que rodea a la muestra y vertido de mercurio en su interior.

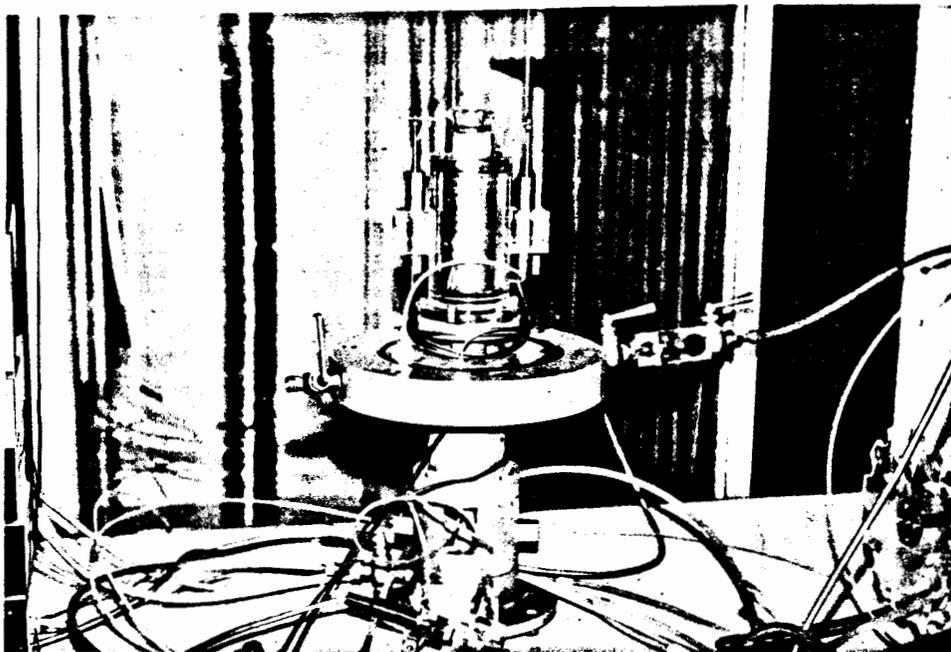


Figura 80m. Colocación de los elementos de medida del estado deformacional de la probeta.

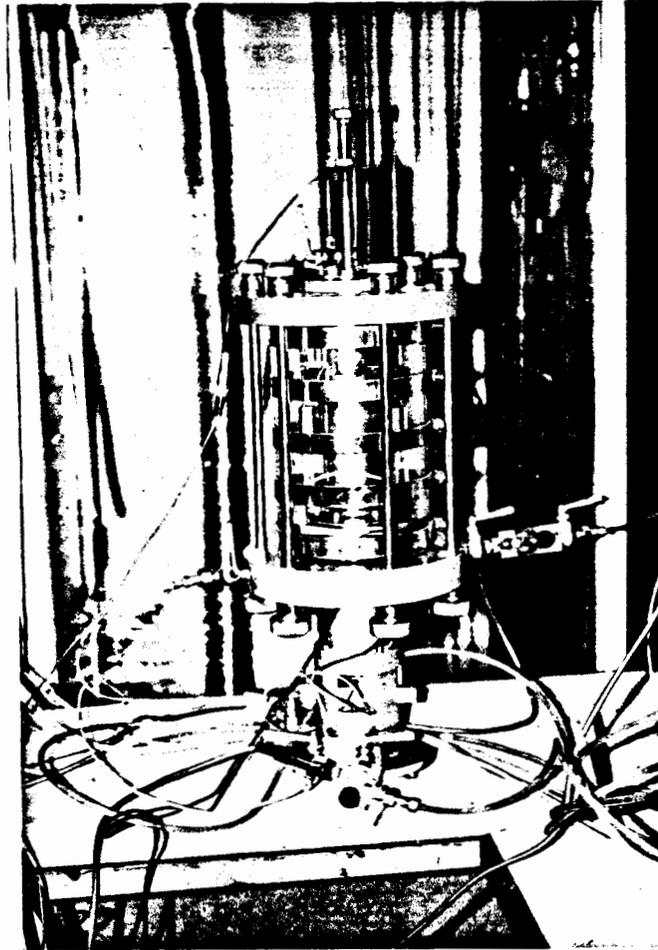


Figura 80n. Cierre de la célula triaxial.

Figuras 80. Puesta en marcha de los ensayos.

▪ llenado con agua desaireada de la célula triaxial.

A partir de este momento comenzaba propiamente el ensayo. El estado tensional aplicado inicialmente a las muestras era el siguiente:

a) Caolín. Por lo que respecta a la succión, se escogió un valor bajo (0,01 MPa) por las razones aducidas con anterioridad. La necesidad de que en todo momento se tenga $p_a > p_v$ para que el agua no pueda fluir por el conducto de presión del aire, impidió que se pudiese aplicar $s=0$ MPa ($p_a = p_v$), en cuyo caso cualquier pequeña variación de las presiones podría producir dicho fenómeno falseando el ensayo. La diferencia de presión indicada (0,01 MPa) fué suficiente para evitar este problema.

Para obtener las succiones se aplicó una presión de aire de 0,1 MPa, que se mantenía constante durante todos los ensayos. Esta presión es la menor que permite utilizar todo el rango de succiones admitido por la piedra porosa de alto valor de entrada de aire empleada en este caso (0,1 MPa). La presión de agua necesaria para obtener la succión de 0,01 MPa fué, en consecuencia, de 0,09 MPa.

Para la presión de cámara inicial se utilizó asimismo un valor bajo (0,145 MPa) compatible con las presiones intersticiales aplicadas ($\sigma_3 > p_a$), de forma que la mayor parte de las deformaciones se produjesen tras el proceso de consolidación inicial.

En cuanto a la tensión de corte fué inicialmente nula.

b) Caolín+arcilla. En este caso el estado tensional inicial fué análogo al anterior salvo en lo que respecta a la succión. Para permitir trayectorias novalas tanto en aumento como en disminución de succión, se fijó un valor inicial de 0,06 MPa ($p_a = 0,1$ MPa y $p_v = 0,04$ MPa).

Al comienzo de cada ensayo se realizaban los pasos siguientes:

- puesta en marcha del programa TNSAA y entrada de datos (número y etiqueta del ensayo, trayectoria de tensiones a seguir, etc.).

- medida del origen de señal de σ_3 , p_v , p_a y q.A (señal para tensión nula).

- entrada en presión de los conductos respectivos de σ_3 , p_v , p_a y q.A y de los transductores correspondientes sin afectar a la muestra, y medida del origen de señal de ϵ_1 , ϵ_r y ΔV_v . A partir de este momento el programa comenzaba a funcionar normalmente midiendo cada Δt pequeño e imprimiendo los resultados. Si se detectaba en estos resultados algún error por lectura defectuosa de orígenes se paraba el programa y se recomenzaba de nuevo (la muestra no había entrado en carga). En caso contrario se sometía a la muestra a su estado tensional inicial: primero se aplicaba σ_3 , inmediatamente después p_a e inmediatamente después p_v . Una vez aplicadas estas tensiones las medidas se realizaban cada Δt mayor, que en este caso se fijó en 10 minutos. Este intervalo de tiempo se consideró adecuado de acuerdo con la velocidad de variación de tensiones utilizada, que más adelante se indica, para obtener con una cierta continuidad el estado de la muestra.

Una vez iniciado el ensayo la muestra quedaba, opcionalmente, uno o más días consolidando sin modificar el estado tensional, siguiendo posteriormente las trayectorias que se hubiesen definido.

4.4. PLANIFICACION DE LOS ENSAYOS Y SALIDA DE RESULTADOS

En los ensayos realizados en esta tesis se ha pretendido estudiar el comportamiento de suelos no saturados al ser éstos sometidos a trayectorias tensionales específicas y conocidas del espacio $(p-p_a, s, q)$. Por esta razón se han llevado a cabo tan sólo ensayos drenados en los que es posible fijar a priori p_v y p_a (y en consecuencia s) en dichas trayectorias, y no ensayos a humedad constante o no drenados en los que p_a , o p_v y p_a , respectivamente, son únicamente conocidos a posteriori. Los ensayos no drenados representan además una situación poco real en la práctica, por cuanto la presión de aire se disipa en general con rapidez.

En el caso de ensayos drenados es importante utilizar una velocidad de variación de las tensiones suficientemente lenta que asegure la disipación continua de un alto porcentaje de las presiones intersticiales generadas. Quedará siempre, sin embargo, una cierta fracción de dichas presiones intersticiales sin disipar, que interesa que sea suficientemente pequeña. Si esto es así se obtendrá una correspondencia fiable entre el estado tensional y el de la muestra medidos en cada instante. No es inmediato calcular la velocidad adecuada a utilizar fijando una presión intersticial máxima sin disipar. Ello conllevaría, entre otras cosas, conocer la permeabilidad del suelo al agua para cada grado de saturación e índice de poros, lo cual no es fácil de obtener (Lloret (1982)).

Estas consideraciones llevaron a fijar una velocidad arbitraria de variación de las tensiones (0,15 MPa/día para el caolín y 0,07 MPa/día para el caolín+arcilla, menor que el anterior por ser un suelo más fino) que fué después comprobada experimentalmente observando la variación del estado de la muestra cuando, tras seguir una determinada trayectoria, se dejaba invariable su estado tensional. En el caso del caolín se comprobó, como más adelante se expone, que el valor

indicado era correcto por cuanto la muestra prácticamente no presentaba cambios al detenerse la trayectoria de tensiones. Para el caolín+arcilla la velocidad resultó ligeramente alta. Por ello durante el proceso de ensayo se redujo algo esta velocidad y en determinados momentos se mantuvo constante el estado tensional hasta la estabilización de las medidas obtenidas. Los valores de las velocidades indicados corresponden a trayectorias reales de σ_3 , σ_p y p_v , no a las correspondientes a $(p-p_a)$, s y q por cuanto en este último caso las posibles correcciones a realizar de ajuste de las trayectorias hacen que su velocidad pueda ser menor. Estas velocidades implicaron que la duración habitual de cada ensayo fuese del orden de una semana o más, habiéndose llegado en uno de ellos a 20 días.

En cada ensayo se define su historia tensional a partir de la trayectoria seguida en el espacio $(p-p_a, s, q)$ tras la consolidación de la muestra en su estado inicial. Los resultados significativos han sido representados en planos $x-y$ con x e y cualesquiera de las variables consideradas en los ensayos o una combinación de ellas. Con el fin de estudiar el tipo de respuesta del suelo se han utilizado asimismo dos parámetros para comprobar si la relación entre el volumen específico de la muestra y la tensión esférica o la succión pueden expresarse de acuerdo con una ley logarítmica, que es la más habitualmente propuesta u observada para ello. En este sentido, si se supone $v=N-\lambda \cdot \ln(p-p_a)$ o $v=N_s-\lambda_s \cdot \ln(s-s_0)$ (introduciendo s_0 para evitar problemas con la segunda expresión en $s=0$) se tiene, diferenciando:

$$\lambda = \frac{p-p_a}{d(p-p_a)} \cdot dv$$

$$\lambda_s = \frac{s+s_0}{d(s+s_0)} \cdot dv$$

donde dv , $d(p-p_0)$ y $d(s+s_0)$ son, en principio, los incrementos entre medidas consecutivas de los ensayos.

Esta representación de λ y λ_0 al variar, respectivamente, $p-p_0$ y $s+s_0$, indicará si dicha ley es apropiada (λ y λ_0 aproximadamente constantes) o no.

Para estudiar otro tipo de relaciones entre v y $(p-p_0)$ o $(s+s_0)$ se deberían haber modificado adecuadamente las expresiones de λ y de λ_0 indicadas. Sin embargo, la buena aproximación obtenida utilizando esta ley logarítmica, tal y como en apartados siguientes se expone, ha hecho que no se consideren otras posibles expresiones.

Con el fin de comprobar la uniformidad de estos parámetros es necesario considerar el estado tenso-deformacional del suelo en al menos dos puntos, para poder calcular dv y $d(p-p_0)$ o $d(s+s_0)$. Estos puntos deben ser cercanos (Δv y $\Delta(p-p_0)$ o $\Delta(s+s_0)$ pequeños) de forma que λ y λ_0 se correspondan realmente con las expresiones anteriormente indicadas. Una primera opción sería tomar dos medidas consecutivas de los ensayos. Esto, sin embargo, puede no ser adecuado debido a que al ser dichas medidas consecutivas cercanas en el tiempo, ligeras derivas de los equipos pueden ser significativas en las expresiones anteriores, dando lugar, localmente, a valores de λ y λ_0 muy variables o anómalos (por ejemplo negativos). Por ello λ y λ_0 se han obtenido entre medidas no consecutivas (cada n medidas), aminorando así los efectos de estas derivas, y permitiendo observar de forma más fiable la variación de dichos parámetros. En ocasiones se ha utilizado un filtrado de los datos de λ y λ_0 con el fin de suavizar las curvas $v-\lambda$ o $v-\lambda_0$ obtenidas. Este filtrado se ha realizado promediando cada valor calculado de λ y λ_0 con los m anteriores y posteriores. Como cifras significativas de los valores de n y m empleados se pueden indicar, respectivamente, 10 y 5, lo cual representa del orden de 0,01 MPa de diferencia máxima entre las medidas consideradas.

Como ha sido ya indicado, prácticamente todos los ensayos se han realizado con el caolín. Únicamente uno, que será expuesto en último lugar, se ha realizado con el caolín+arcilla. El tiempo de consolidación utilizado ha sido de un día para el caolín y de tres días para el caolín+arcilla. Estos periodos de tiempo fueron suficientes para que se estabilizase el estado de las muestras.

Los primeros ensayos realizados, cuyos resultados no fueron fiables y han sido desechados, sirvieron para corregir algunos defectos del equipo empleado. Fundamentalmente la modificación del flotador de medida de la deformación radial impidiendo que se acodalase, del cilindro superior a la muestra dividiéndolo en dos partes para facilitar el vertido del mercurio y haciéndolo poroso en sus dos tercios inferiores, y la adición de la pieza acoplada inferiormente al transductor de carga asegurando la verticalidad de la muestra, como casos más destacables, permitieron realizar ensayos con fiabilidad. Algunos problemas posteriores, sin embargo, como la rotura de alguna pieza, caídas de tensión esporádicas o la medida incorrecta de determinados parámetros, hicieron que se tuviese que prescindir de diversos resultados, obligando, en su caso, a solventar dichos problemas (mecanización de nuevas piezas, etc.).

Estos mismos ensayos previos fueron también aprovechados con el fin de comprobar la capacidad del equipo para mantener una determinada trayectoria tensional, como más adelante se indica.

El programa de ensayos finalmente realizado ha incluido el estudio de los siguientes puntos:

a) comprobación de las velocidades reales de variación de cada una de las tensiones y de la uniformidad de éstas últimas cuando son mantenidas constantes.

b) comprobación de la suficiente lentitud en la variación de las tensiones durante los ensayos.

c) obtención del estado de las muestras tras el periodo de consolidación.

d) repetibilidad de los ensayos.

e) variación del estado final de las muestras dependiendo de la historia tensional seguida en trayectorias con succión creciente y decreciente.

f) compresibilidad del suelo ante cambios en la tensión esférica para varios valores de la succión.

g) compresibilidad del suelo ante cambios en la succión para varios valores de la tensión esférica.

h) comportamiento en ensayos con la tensión de corte creciente.

i) estados de rotura.

j) compresibilidad del caolín+arcilla ante cambios en la succión para varios valores de la tensión esférica.

No existe una correspondencia biunívoca entre estos puntos y cada ensayo o grupo de ensayos realizados, sino que al planificar cada uno de estos últimos se tuvieron en cuenta, en general, varios aspectos de interés a estudiar. Por otro lado se ha preferido, por un mayor orden y claridad en la exposición, describir los resultados, en los siguientes apartados, de acuerdo con los aspectos que se pretenden estudiar en cada caso, utilizando sucesivamente los ensayos

necesarios, en vez de describir éstos uno a uno de forma inconexa y después obtener las conclusiones.

En las figuras 81a se muestran las diferentes trayectorias tensionales seguidas en el espacio $(p-p_s, s, q)$ correspondiente a los ensayos que se presentan en los siguientes apartados y la notación empleada en cada caso. De ellos los E1 a E19 se realizaron con el caolín, y el E20 con el caolín+arcilla.

Como se observa en estas figuras algunas de las ramas de estos ensayos, concretamente las AC (E3) e IZ (E5), tuvieron que ser desechadas. Esto fué debido a que en ellas se presentaron problemas con los sistemas de alimentación de algunos transductores que hicieron que se perdiese el origen de las medidas realizadas. En el caso de la rama AC (E3) los resultados del ensayo son aprovechables a partir del punto C si se consideran las distintas variables incrementalmente desde él. Adicionalmente dos ensayos tuvieron que ser reiniciados al efectuarse en ellos falsas maniobras en la aplicación del estado tensional inicial.

Como ha sido ya indicado los ensayos se programaron en varios casos para estudiar diferentes aspectos del comportamiento del suelo. De esta forma en muchos de ellos las muestras fueron llevadas hasta rotura tras seguir en $q=0$ una determinada trayectoria de interés. Otros, sin embargo, por ejemplo los E16, E18 y E19, se realizaron únicamente para estudiar aspectos específicos (en dichos casos la resistencia al corte).

De las distintas trayectorias mostradas en las figuras 81a algunas se repitieron varias veces. Este es el caso, por ejemplo, de los ensayos E1, E2 y E17, como más adelante se indica.

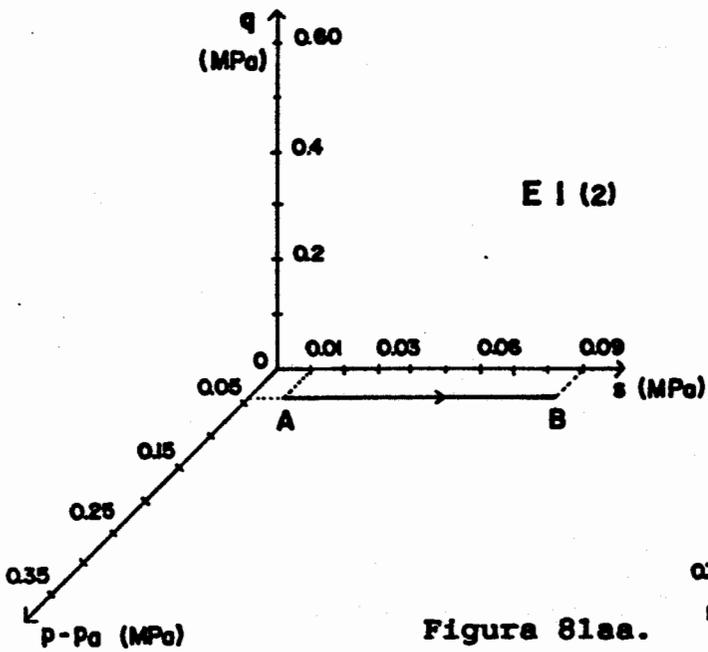


Figura 81aa.

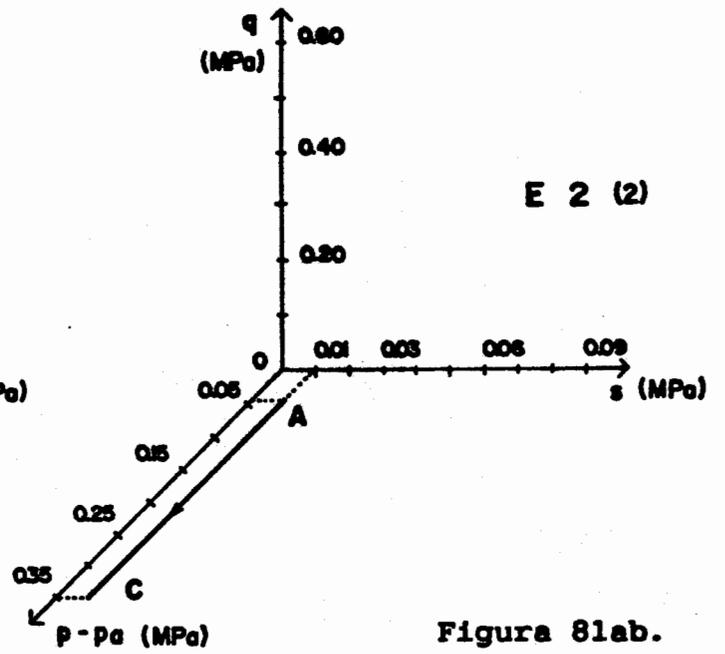


Figura 81ab.

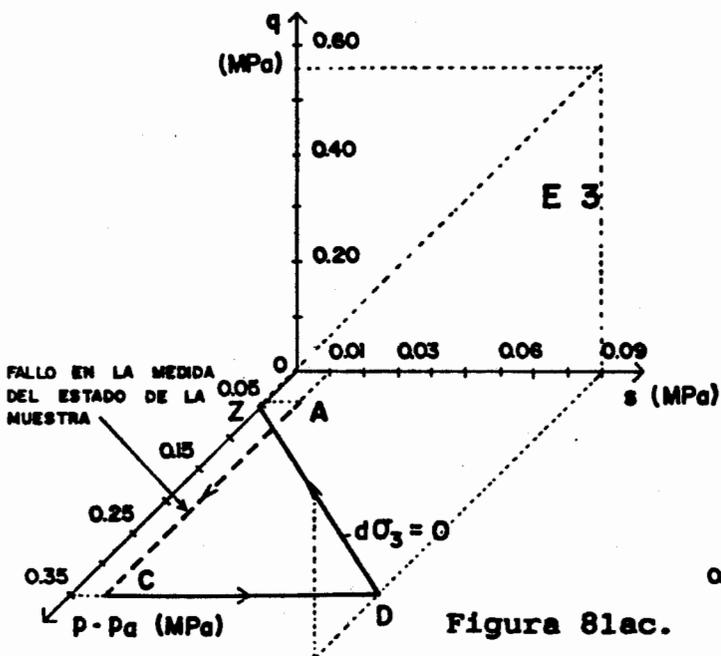


Figura 81ac.

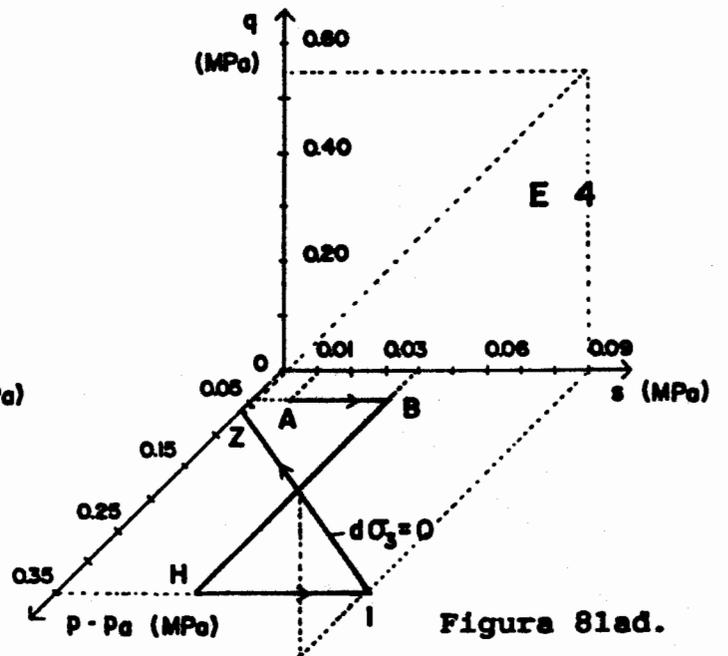


Figura 81ad.

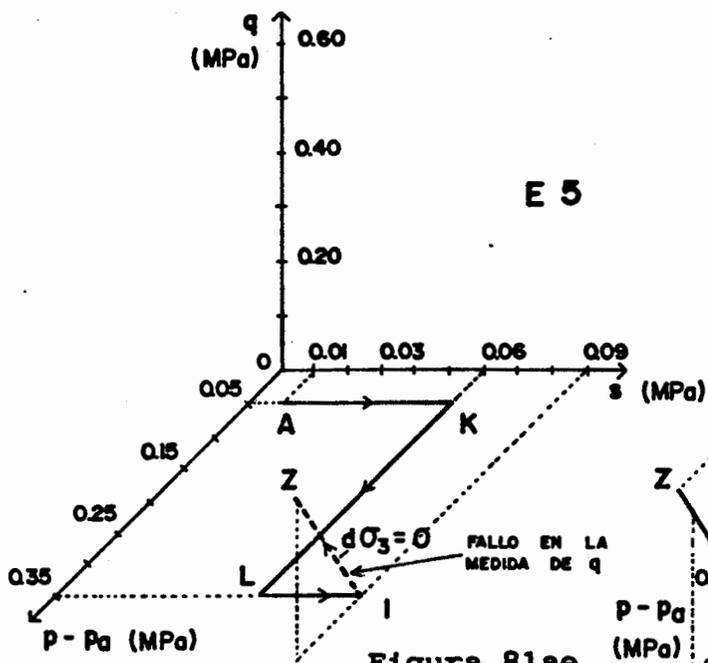


Figura 81ae.

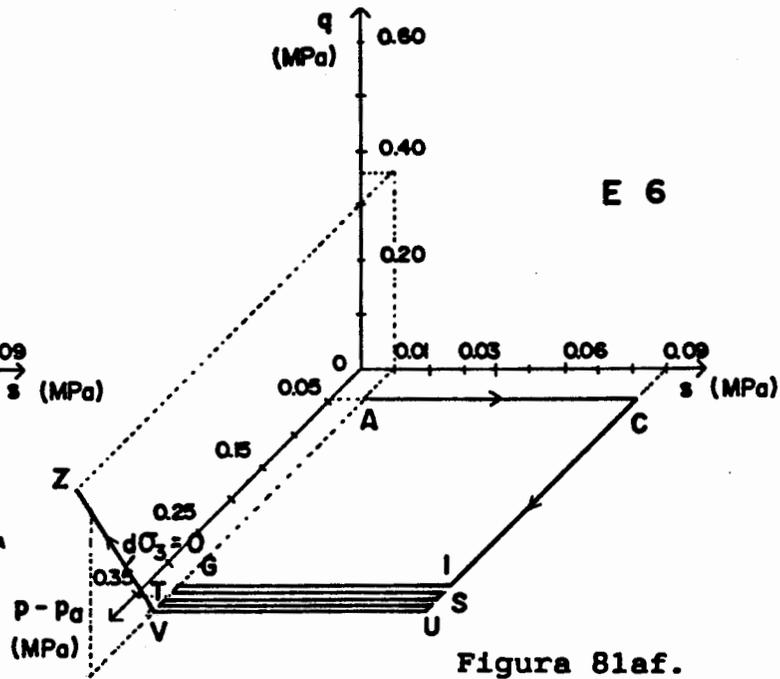


Figura 81af.

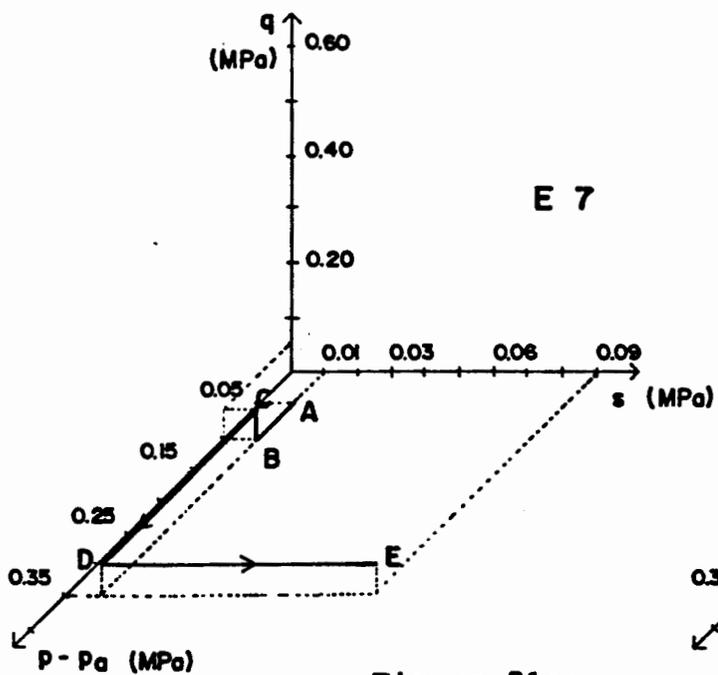


Figura 81ag.

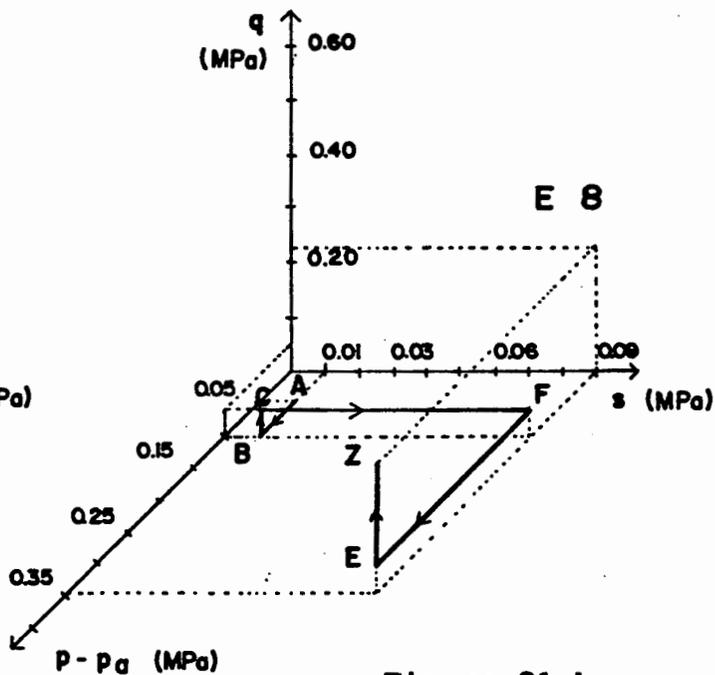
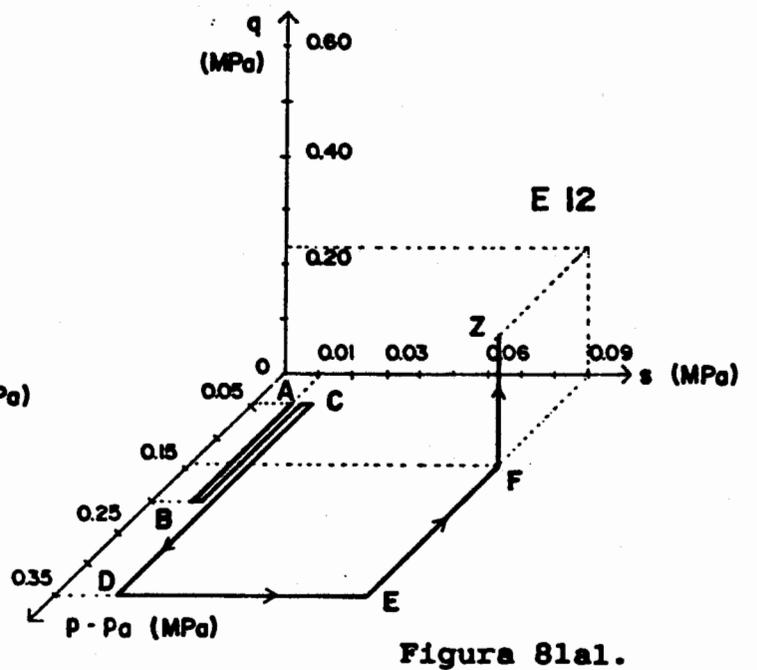
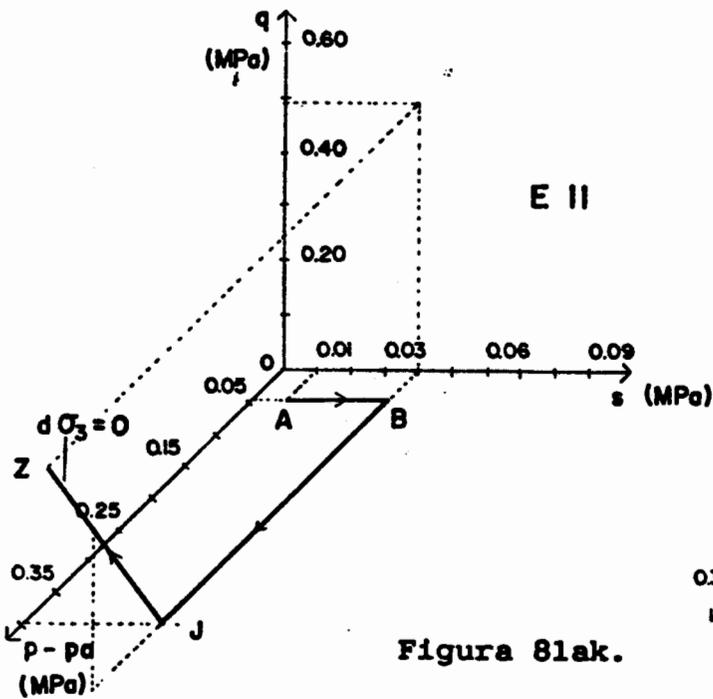
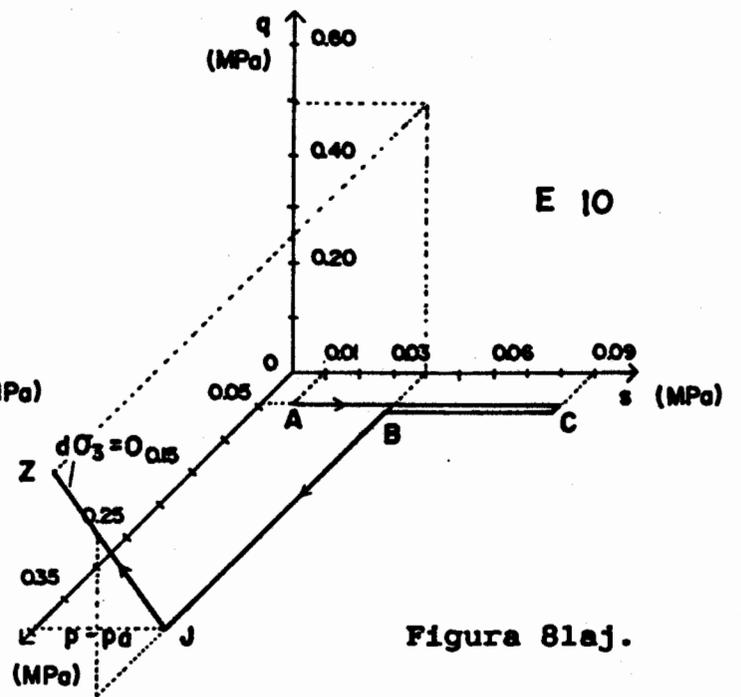
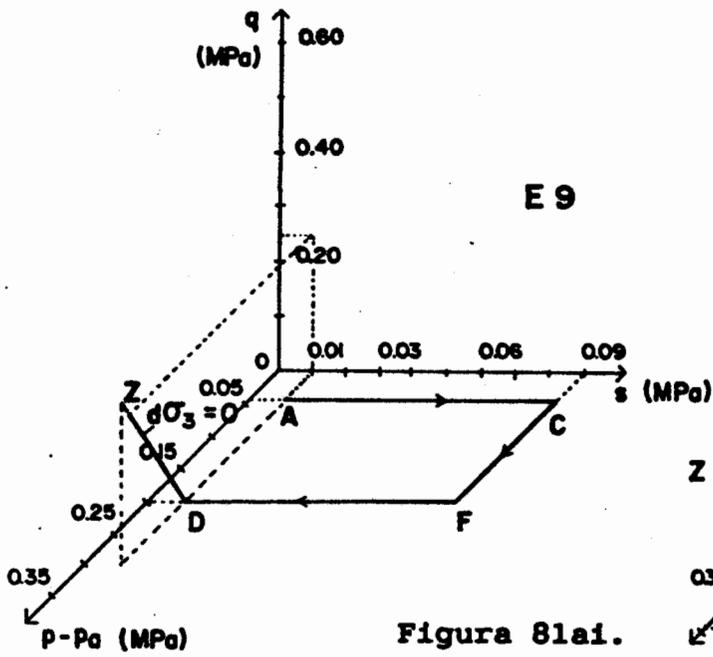
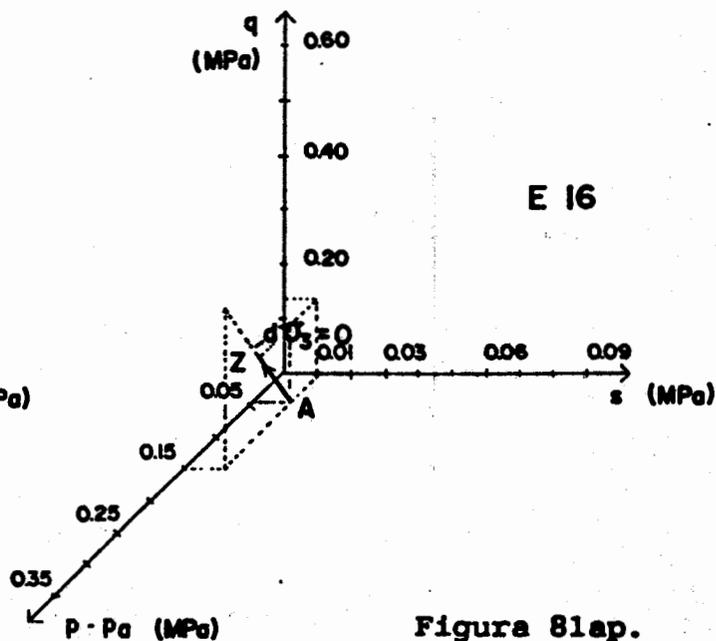
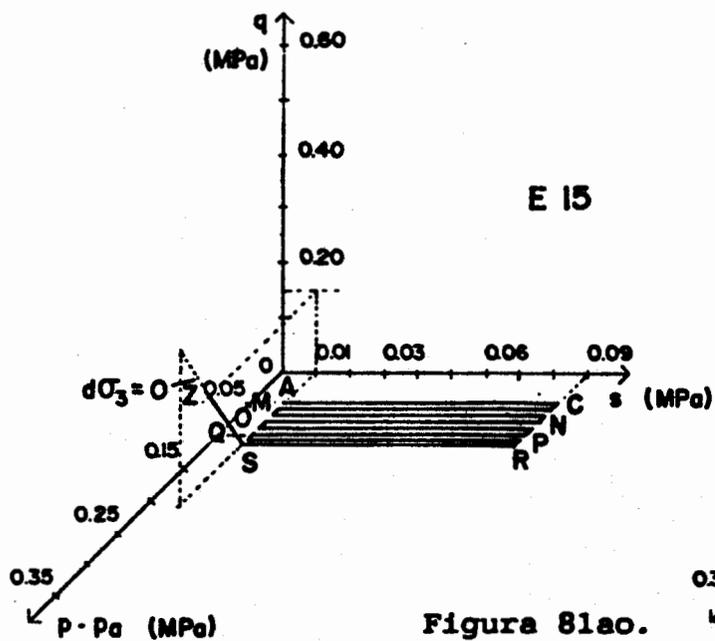
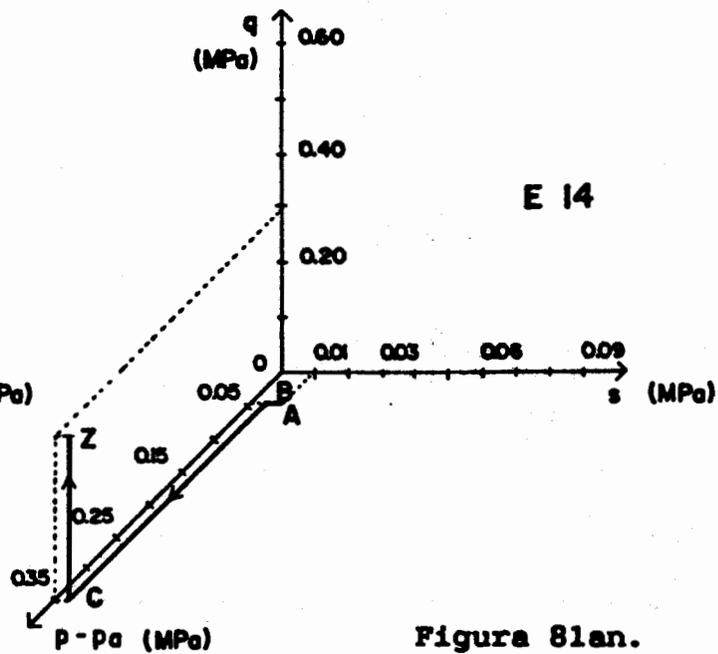
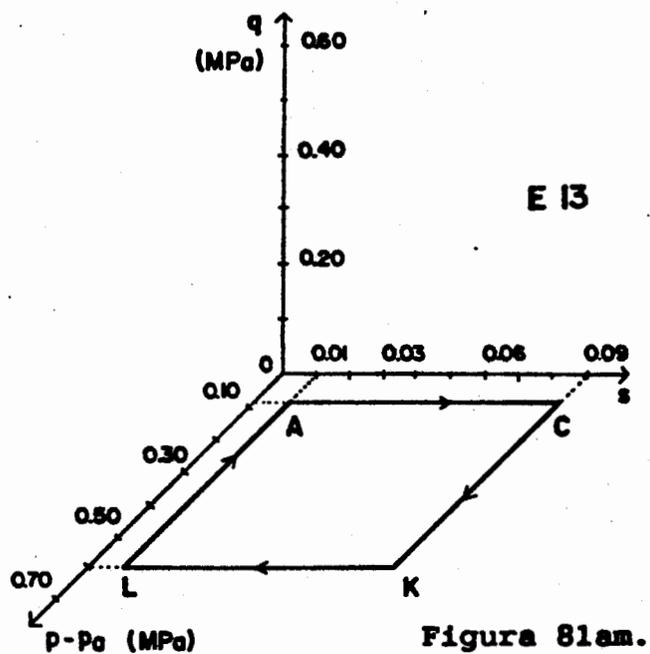


Figura 81ah.





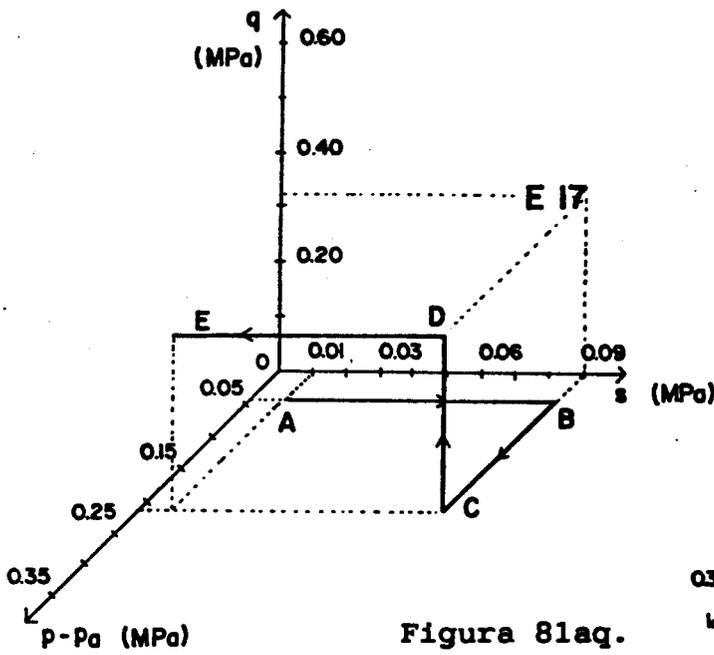


Figura 81aq.

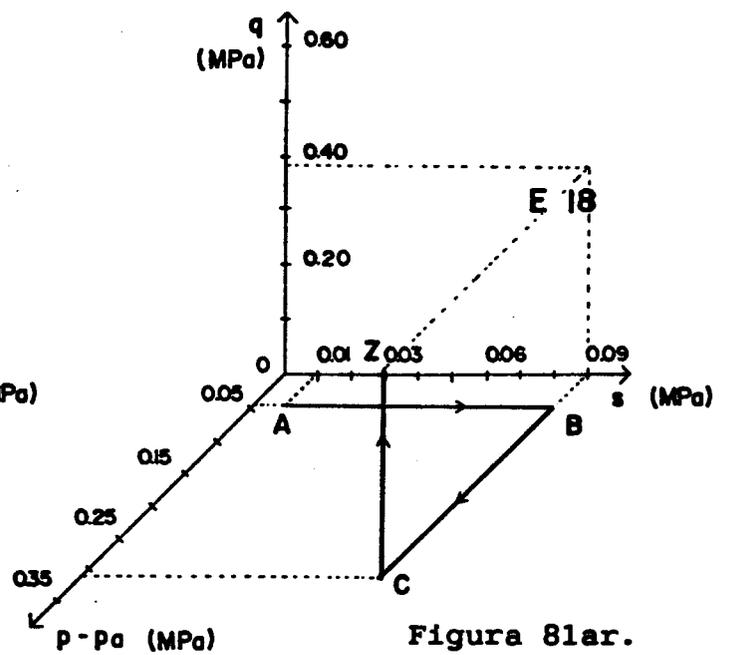


Figura 81ar.

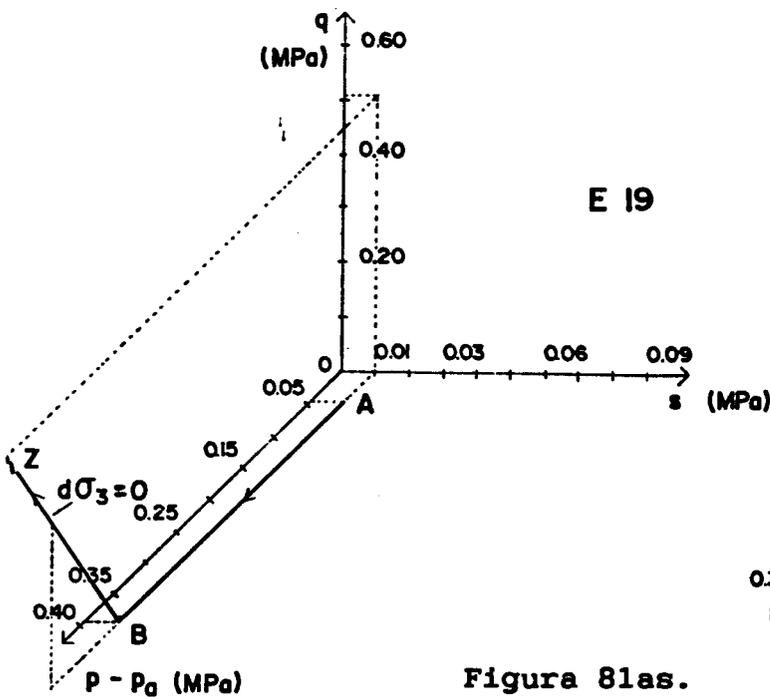


Figura 81as.

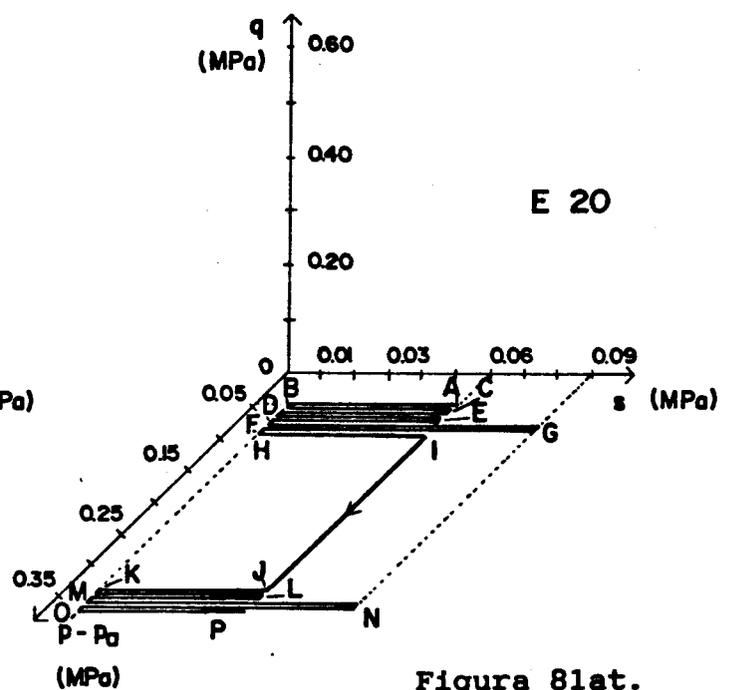


Figura 81at.

Figuras 81a. Relación de ensayos realizados.

En las figuras 81b se muestran las mismas ramas de los ensayos incluidos en las figuras 81a, agrupadas de acuerdo con los aspectos a estudiar tal y como a continuación se indica:

- trayectorias 81ba. Comprobación de la repetibilidad de los ensayos. Con este fin estas ramas se repitieron dos veces.

- trayectorias 81bb, 81bc y 81bd. Variación del estado final de las muestras dependiendo de la historia tensional seguida en trayectorias con succión creciente y decreciente y tensión de corte constante.

- trayectorias 81bb, 81bc, 81bd, 81be, 81bf y 81bg. Comportamiento del suelo ante variaciones de la tensión esférica.

- trayectorias 81bh y 81bi. Comportamiento del suelo ante incrementos de la succión.

- trayectorias 81bi. Comportamiento del suelo ante reducciones de la succión (colapso e hinchamiento).

- trayectorias 81bj. Comportamiento del suelo ante incrementos de la tensión de corte. El ensayo E17 puede considerarse incluido en estas trayectorias por cuanto la muestra llega a rotura, aunque sea en un proceso de disminución de la succión. Este ensayo tuvo que ser repetido tres veces hasta conseguir la rotura de la muestra en dicho proceso, tal y como en el apartado correspondiente se expone.

- trayectoria 81bk. Comportamiento del caolín+arcilla ante incrementos y reducciones de la succión.

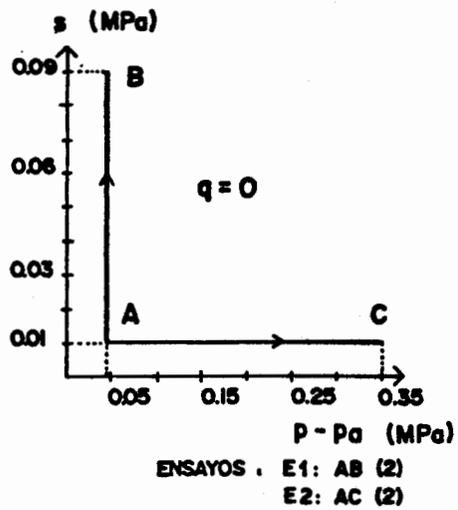


Figura 81ba.

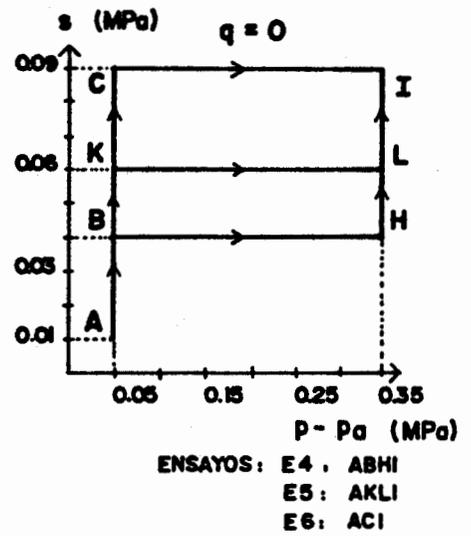


Figura 81bb.

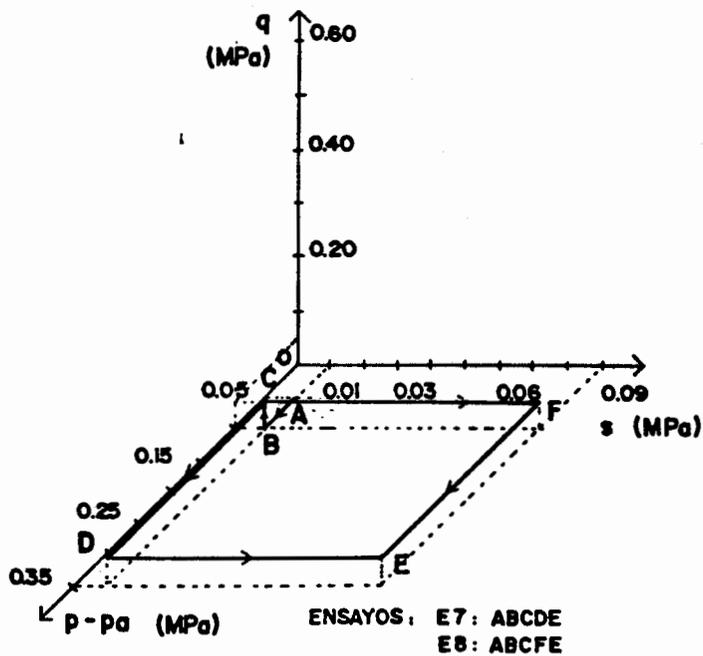


Figura 81bc.

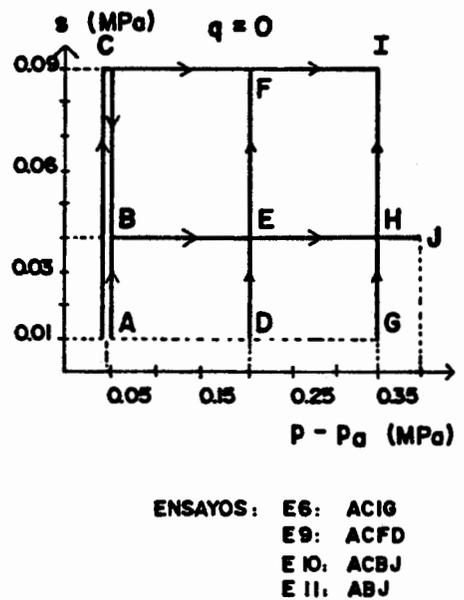


Figura 81bd.

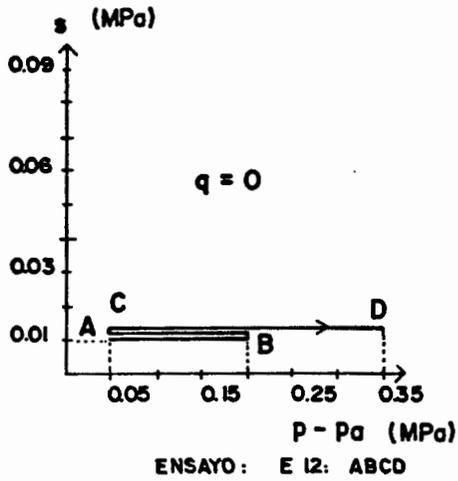


Figura 81be.

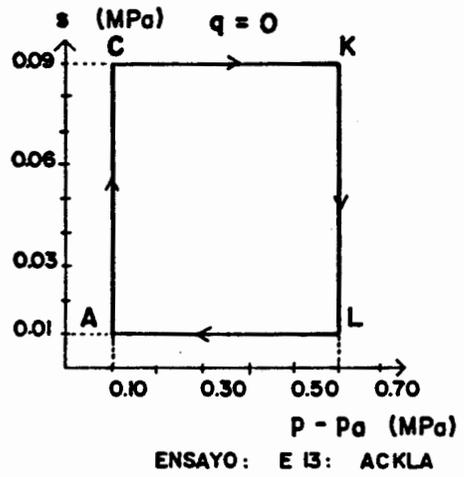


Figura 81bf.

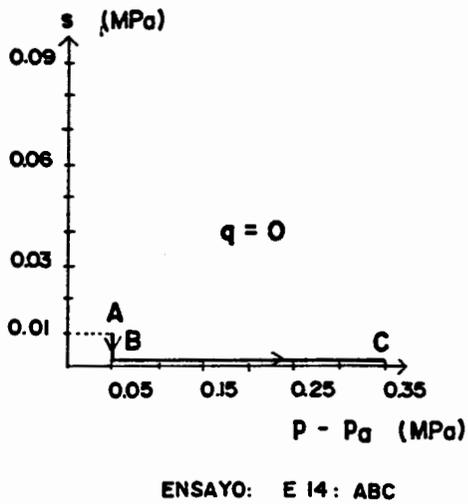


Figura 81bg.

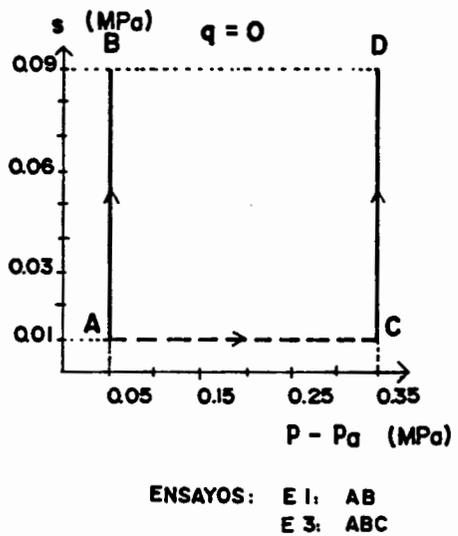


Figura 81bh.

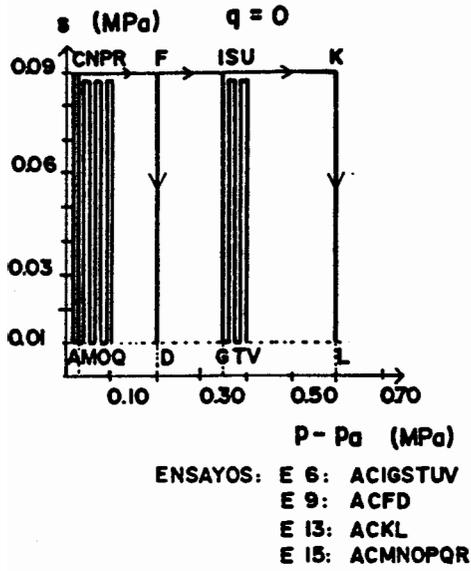


Figura 81bi.

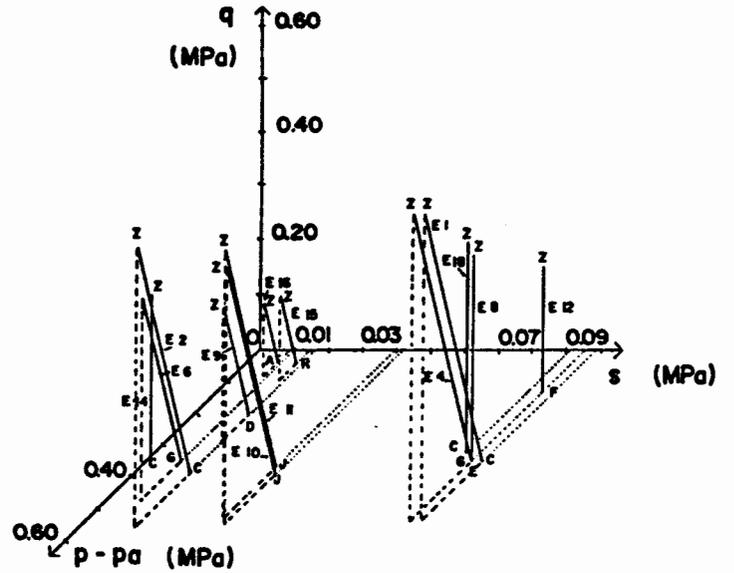


Figura 81bj.

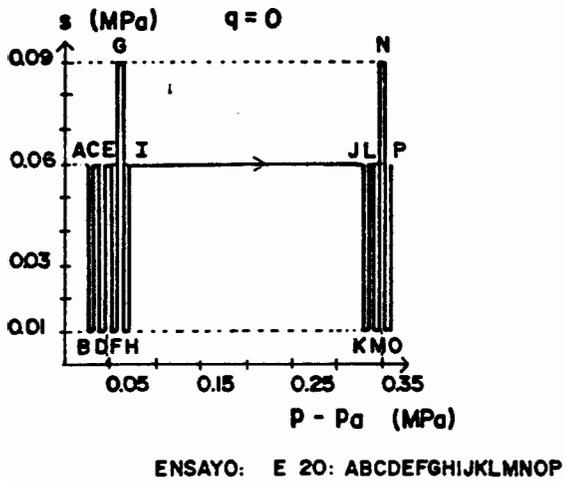


Figura 81bk.

Figuras 81b. Ramas de los ensayos realizados agrupadas por aspectos a estudiar.

Figuras 81. Trayectorias tensionales seguidas en los ensayos realizados.

4.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

4.5.1. COMPROBACIONES PREVIAS

4.5.1.1. Capacidad del equipo para mantener una determinada trayectoria tensional

En varios de los ensayos previos realizados se ha comprobado la evolución de las diferentes tensiones aplicadas ($p-p_s$, s y q), tanto cuando son progresivamente modificadas como cuando son mantenidas constantes mientras varían otras tensiones. Las figuras 82 muestran diversas curvas tensión-tiempo procedentes de estos ensayos en las que se observa que dicha evolución, tanto en lo que respecta a su velocidad de variación como a su uniformidad, según el caso, es muy regular.

Se observa asimismo en estas curvas que la velocidad de variación de las tensiones no es constante en todos los casos. Por una parte, la velocidad de variación de la tensión de corte (en trayectorias con $d(p-p_s)=0$ y $ds=0$) es diferente que la de la tensión esférica (con $dq=0$) o la de la succión, debido a que lo que realmente se modifica en este caso con el sistema motorreductor a la misma velocidad que σ_s y p_s es σ_p y no q , siendo $dq=k.d\sigma_p$. Por otra parte, en trayectorias que deben ser sucesivamente corregidas (por ejemplo $dq>0$ y $d(p-p_s)=0$) las velocidades reales se reducen por efecto del tiempo empleado en dichas correcciones, aunque estas correcciones se hicieron a mayor velocidad para minimizar este efecto.

En cualquier circunstancia la velocidad de variación de cada tensión ha sido uniforme en todos los ensayos para cada tipo de trayectoria. En el caso de la tensión esférica (en $q=0$) y en el de la succión esta velocidad ha sido del orden de 0,15 MPa/día.

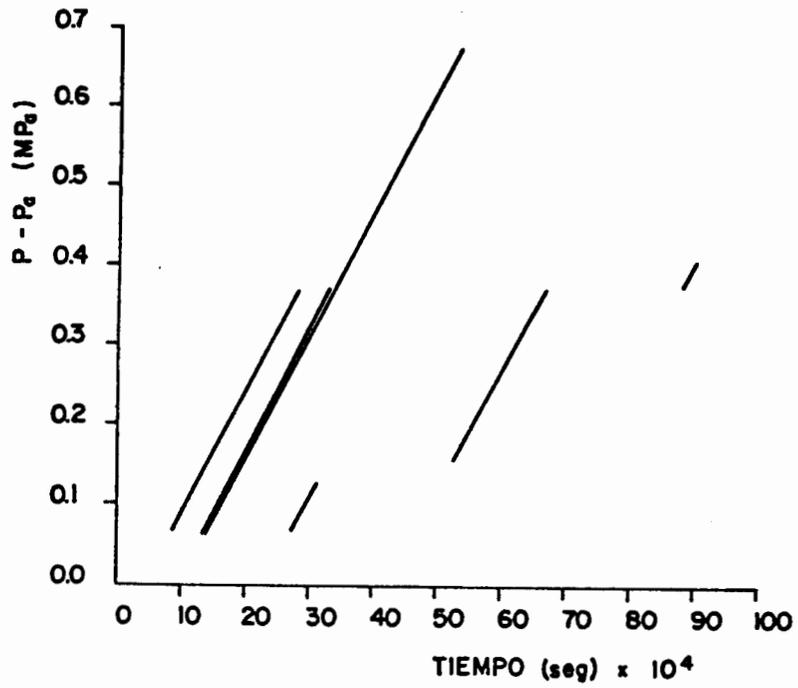


Figura 82a. Evolución de $p - p_a$ en procesos con $d(p - p_a) > 0$.

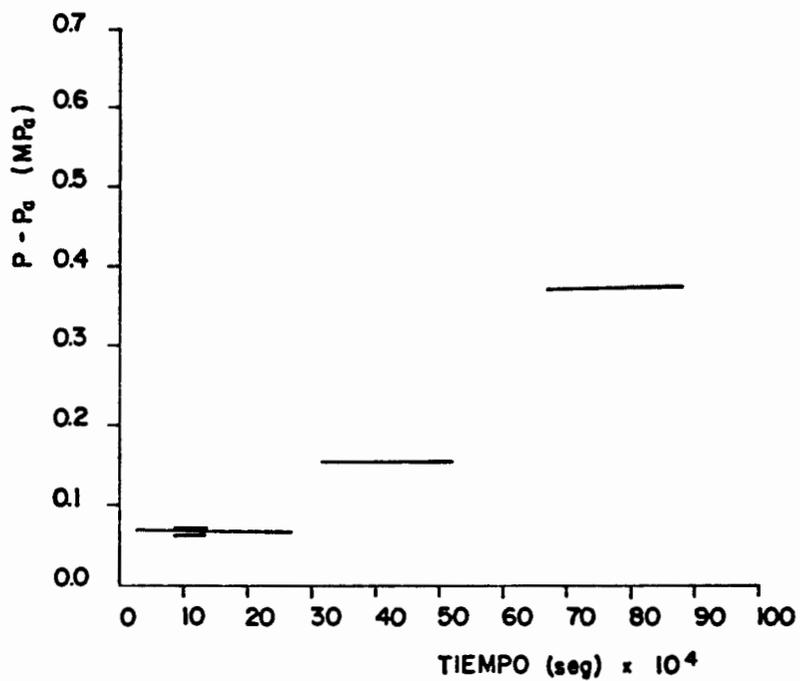


Figura 82b. Evolución de $(p - p_a)$ en procesos con $d(p - p_a) = 0$.

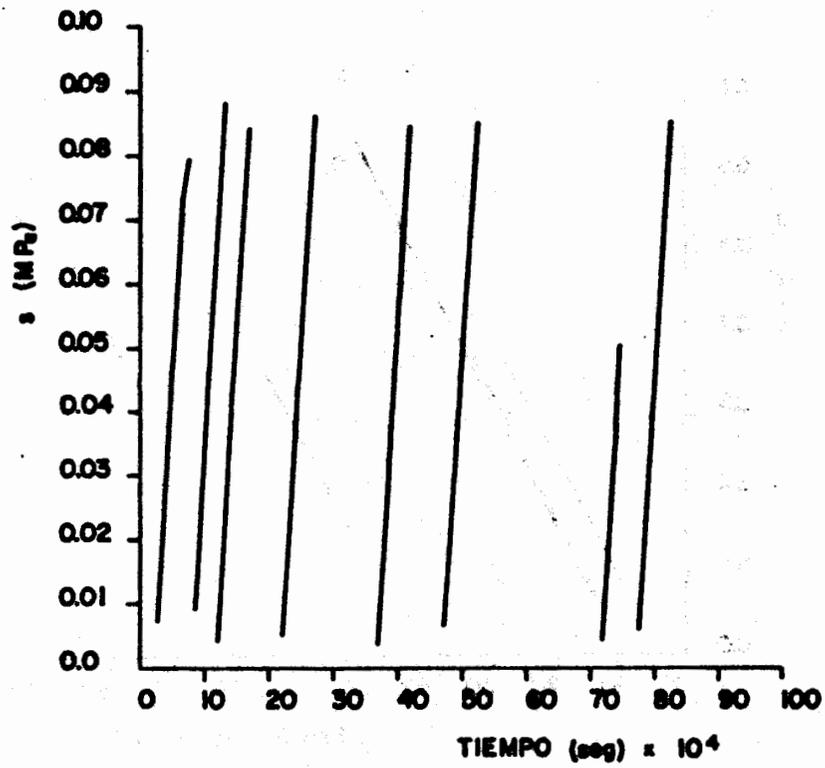


Figura 82c. Evolución de s en procesos con $ds > 0$.

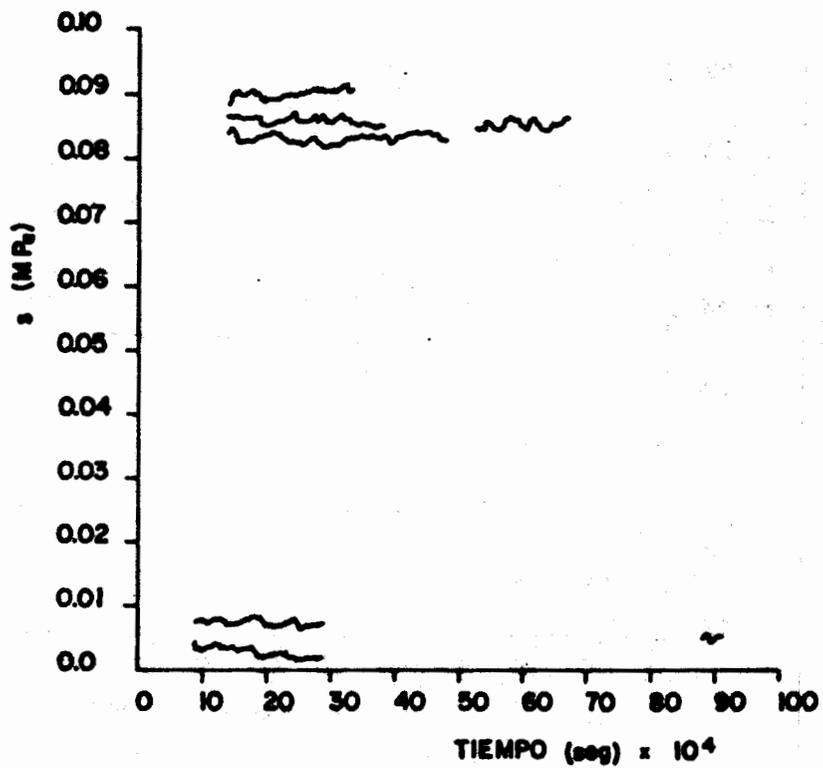


Figura 82d. Evolución de s en procesos con $ds = 0$.

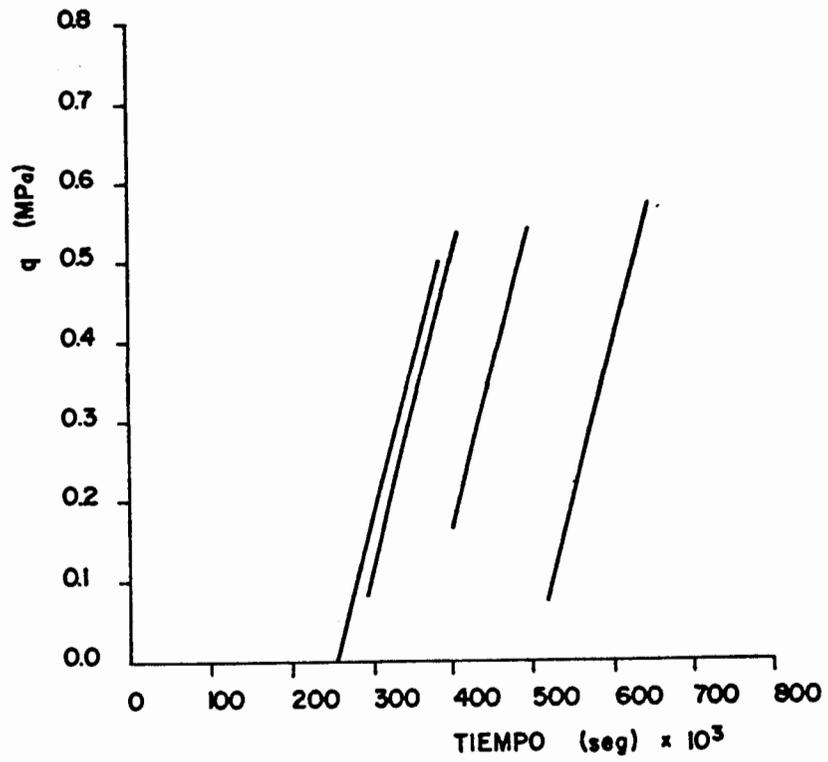


Figura 82e. Evolución de q en procesos con $dq > 0$.

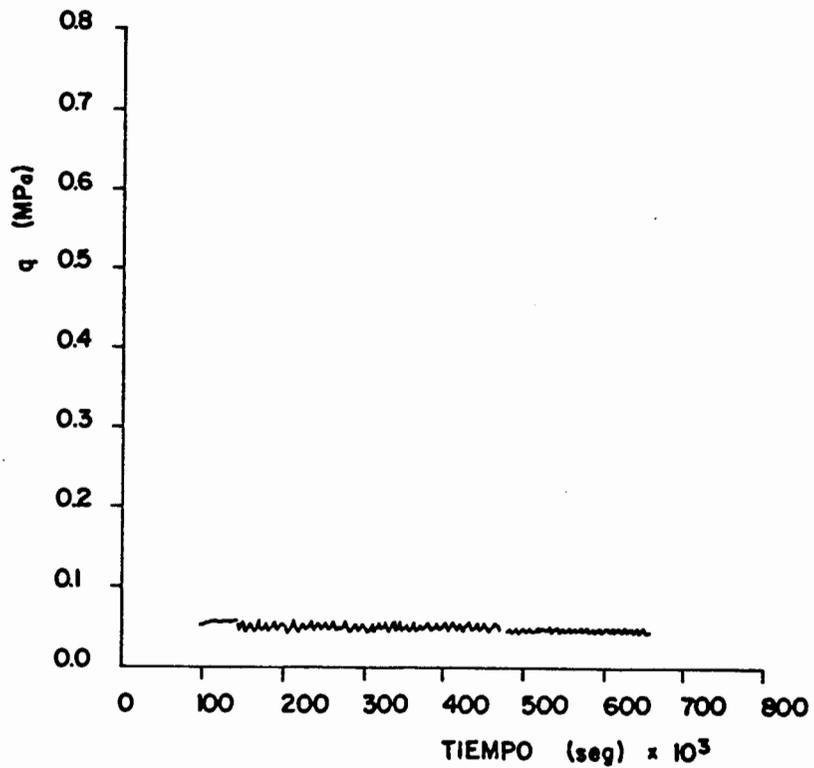


Figura 82f. Evolución de q en procesos con $dq = 0$.

Figuras 82. Evolución de las variables tensionales durante los ensayos.

4.5.1.2. Uniformidad del estado de las muestras al fijar las tensiones

En las figuras 83 se puede comprobar la evolución del estado de las muestras (volumen específico, humedad y grado de saturación) en varios de los ensayos realizados cuando se mantienen constantes las tensiones tras haber seguido una determinada trayectoria. Como se observa, los diferentes parámetros se mantienen prácticamente constantes en el tiempo, si bien inicialmente presentan una ligera variación hasta estabilizarse. Este fenómeno es lógico por cuanto al variar de forma continua las tensiones y fijarlas instantáneamente queda siempre una cierta fracción de las presiones intersticiales sin disipar, que en este caso se comprueba que tiene que ser pequeña al ser asimismo pequeña la variación de dichos parámetros. Esto implica que las velocidades utilizadas en los ensayos pueden considerarse como suficientemente lentas, de forma que se permite la disipación continua de un alto porcentaje de las presiones intersticiales generadas.

4.5.1.3. Estado de las muestras tras la consolidación inicial

Con el fin de determinar el estado de las muestras tras el proceso de consolidación, se ha representado la evolución de dicho estado (volumen específico, humedad y grado de saturación) durante el periodo de consolidación en varios de los ensayos realizados (figuras 84). Debido a que al cargar inicialmente la muestra, ésta se ve sometida a una deformación instantánea por no estar totalmente saturada y adicionalmente se miden en ese momento otras deformaciones, correspondientes, por ejemplo, a la expulsión del aire que pueda existir entre la muestra y la

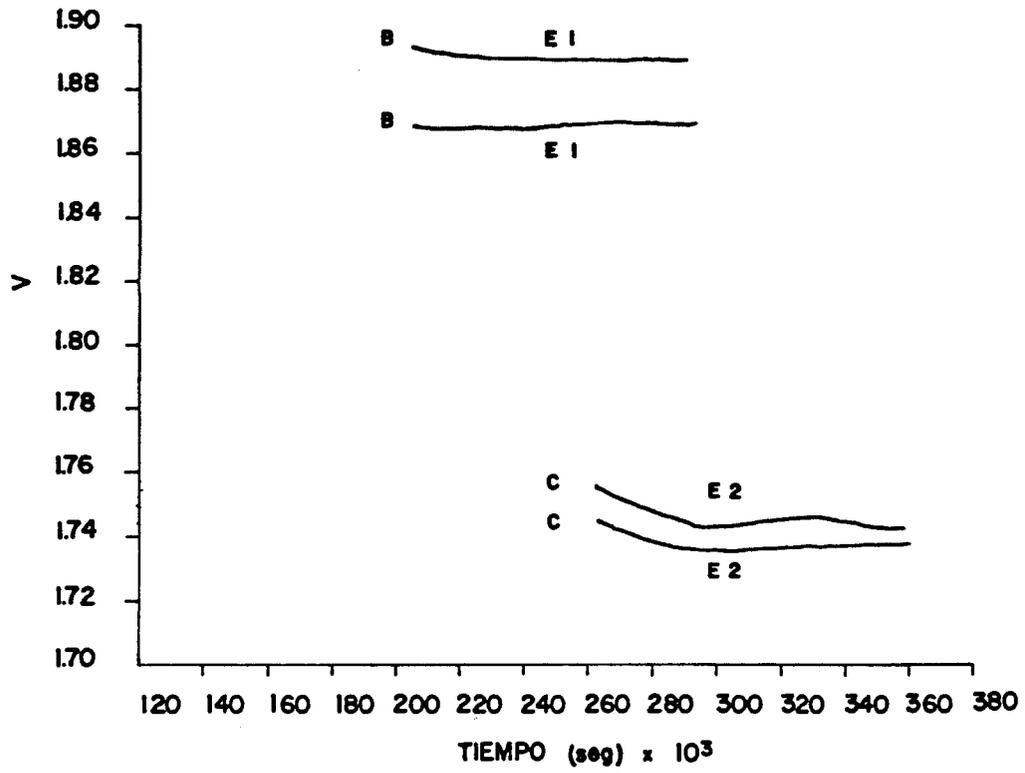


Figura 83a. Volumen específico.

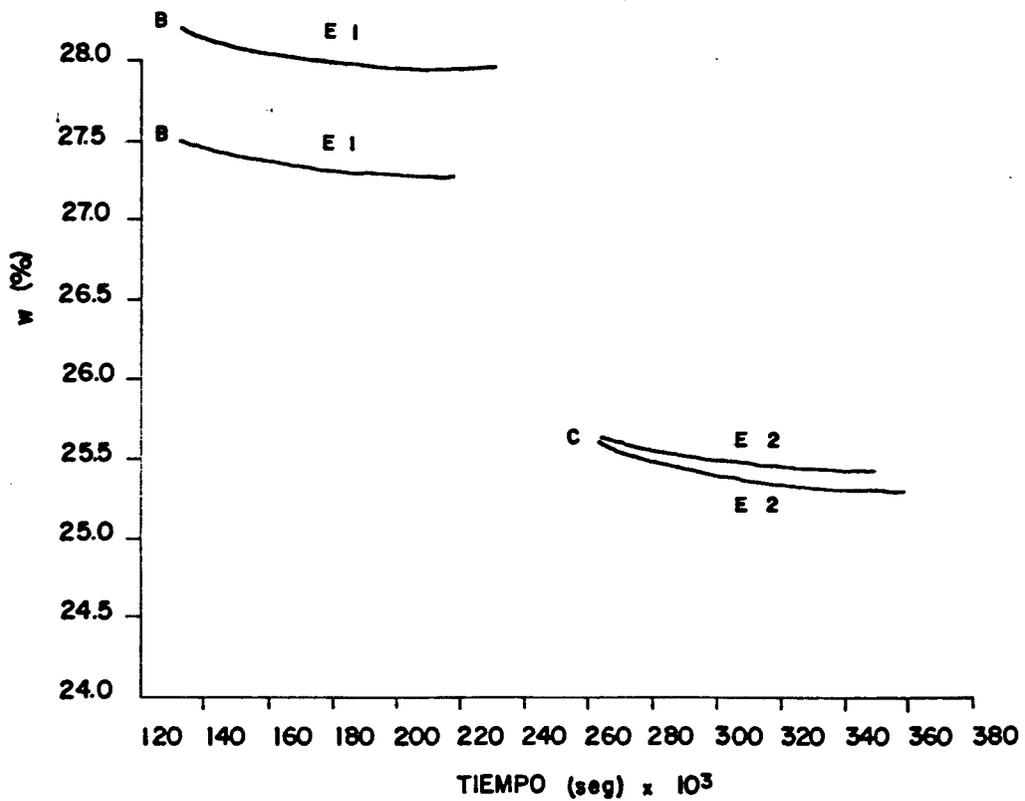


Figura 83b. Humedad.

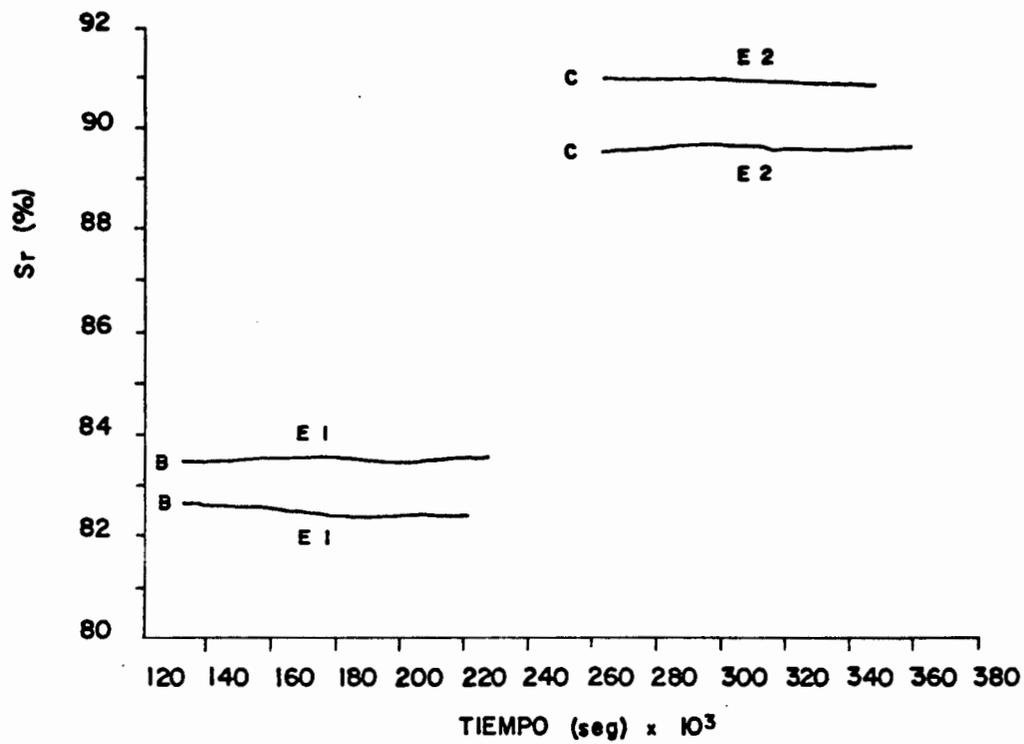


Figura 83c. Grado de saturación.

Figuras 83. Uniformidad del estado de las muestras al mantener constante el estado tensional.

membrana que la rodea, siendo difícil separar una medida de la otra, se han realizado correcciones sobre los resultados obtenidos para dibujar las curvas presentadas. Al no ser de esperar deformaciones instantáneas importantes de la muestra, por ser su grado de saturación relativamente alto, y haberse medido, de hecho, deformaciones pequeñas, se ha optado por prescindir de la primera medida realizada que incluye dichos fenómenos asignando al siguiente punto medido las características del suelo (v , w y S_r) previamente obtenidas en el laboratorio. Con esta corrección el error es pequeño y, en cualquier caso, no afecta a los resultados relativos entre ensayos.

Las curvas representadas muestran una cierta dispersión entre ellas probablemente debido a las propias condiciones iniciales de cada muestra. Con el fin de poder comparar con más facilidad los resultados de los ensayos se ha considerado que tras la consolidación inicial todas las muestras parten del mismo estado. Este estado ha sido deducido de acuerdo con los resultados presentados en las figuras 84 tomando un valor medio de v , w y S_r al final del proceso de consolidación. Los valores adoptados han sido $v=1,9155$, $w=30,16\%$ y $S_r=87,27\%$. Para ajustar este estado se han corregido las deformaciones, la humedad y el grado de saturación de las muestras a lo largo de las trayectorias tensionales aumentándolas o disminuyéndolas adecuadamente. Esta corrección equivale a considerar el comportamiento de las diferentes muestras relativo a su estado tras la consolidación inicial.

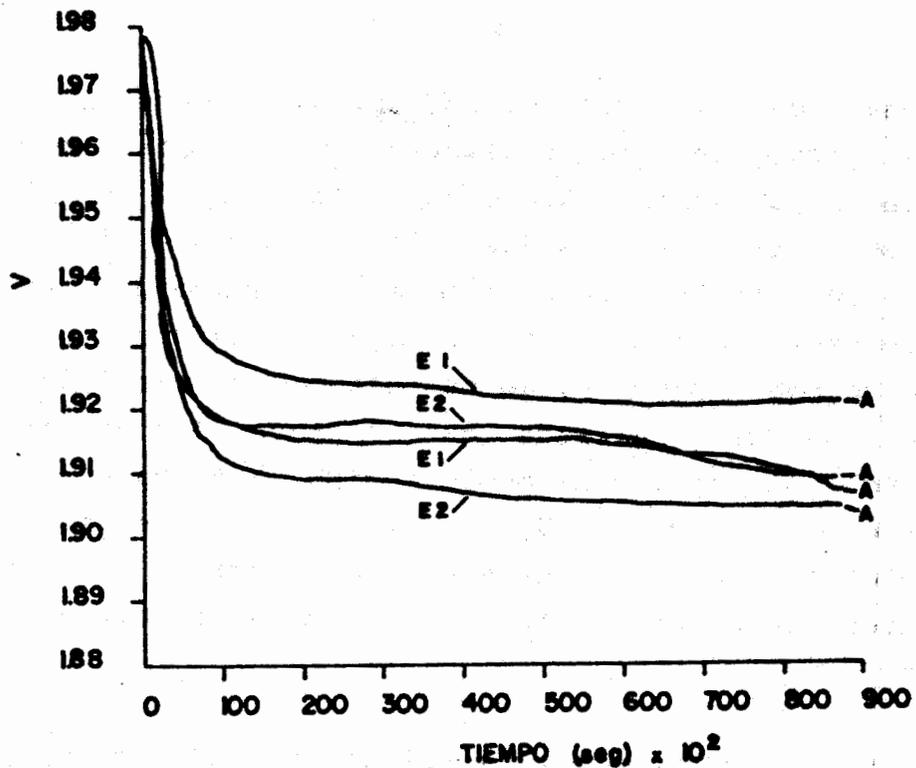


Figura 84a. Volumen específico.

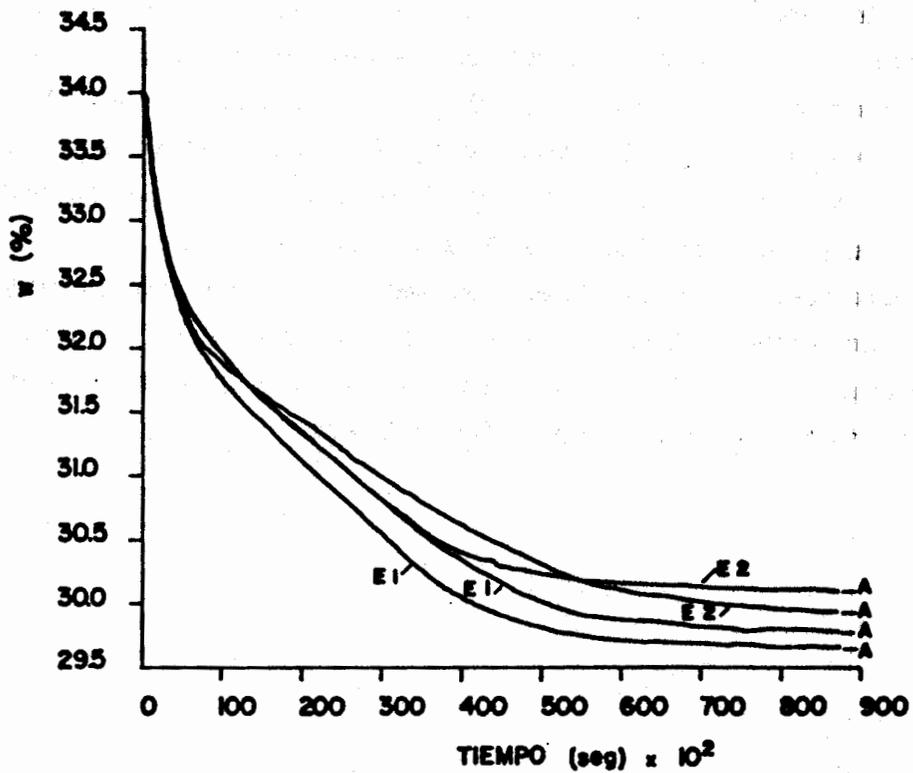


Figura 84b. Humedad.

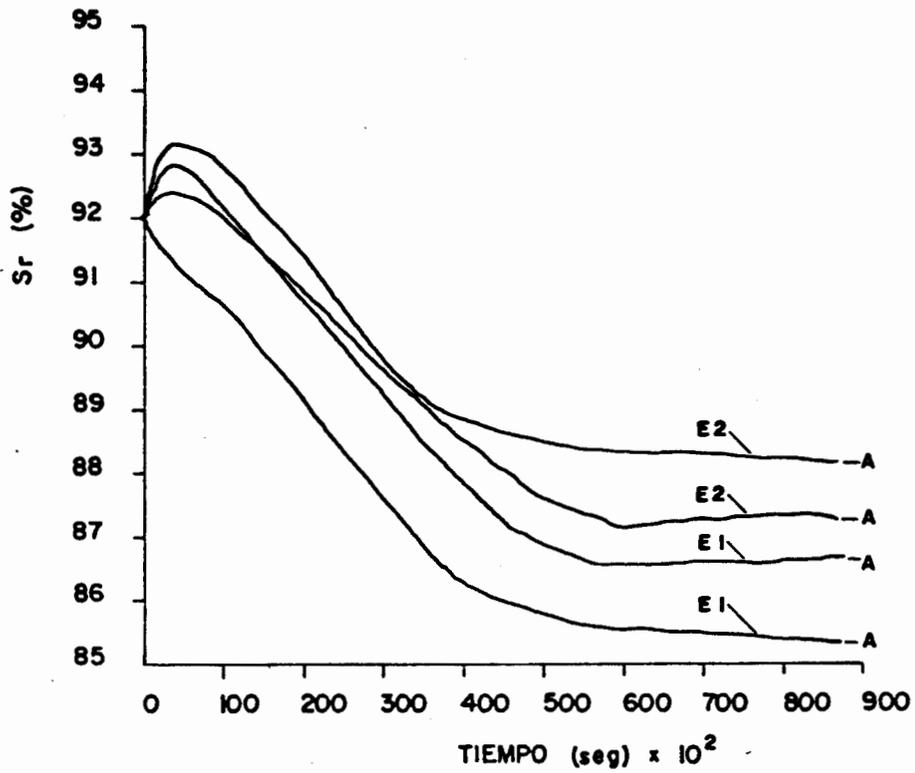


Figura 84c. Grado de saturación.

Figuras 84. Evolución del estado de las muestras durante el proceso de consolidación inicial.

4.5.1.4. Repetibilidad de los ensayos

Con el fin de comprobar la fiabilidad de los resultados obtenidos se han representado gráficamente los parámetros del estado de las muestras en ensayos diferentes en los que se han seguido las mismas trayectorias tensionales (figuras 85). Como se observa puede existir en algunos casos cierta dispersión, especialmente en el grado de saturación, al ser obtenido de forma más indirecta (a partir de ϵ_v y w) acumulando las posibles desviaciones de las medidas originales. Pese a ello la repetibilidad puede considerarse correcta.

4.5.2. COMPORTAMIENTO DEL SUELO

4.5.2.1. Dependencia del estado de las muestras con la trayectoria tensional

Para comprobar la variación del estado de las muestras con la historia tensional seguida en procesos en los que se produzcan aumentos de succión, se han realizado ensayos incluyendo diferentes trayectorias tensionales con el mismo origen y final. La figura 86a muestra estas trayectorias y las figuras 86b, c y d los resultados correspondientes al volumen específico, a la humedad y al grado de saturación, respectivamente. Como se observa en estas figuras el estado tensional pasa de $p-p_a=0,045$ MPa y $s=0,01$ MPa a $p-p_a=0,35$ MPa y $s=0,09$ MPa. El aumento de la tensión esférica se realiza en cada caso a una succión constante y diferente.

En la figura 86b se comprueba como, al aumentar la succión, el suelo se comporta con más rigidez ante incrementos de la tensión esférica. Asimismo en la figura 86d se observa como las muestras más deformables ante cambios de dicha tensión esférica (menor succión) aumentan

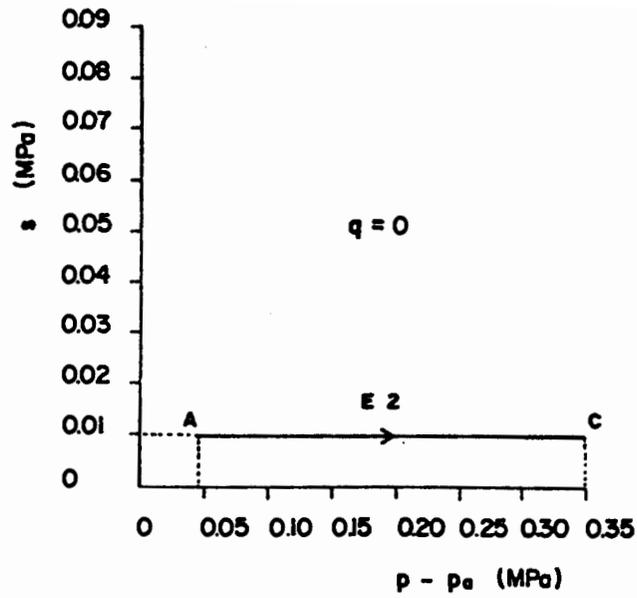


Figura 85aa. Trayectorias tensionales.

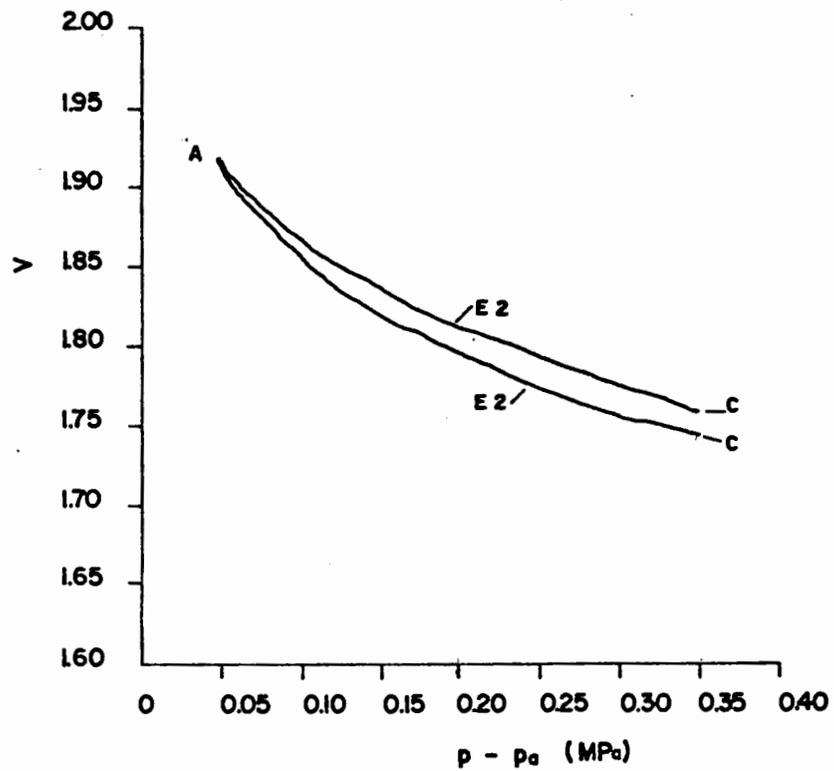


Figura 85ab. Volumen específico.

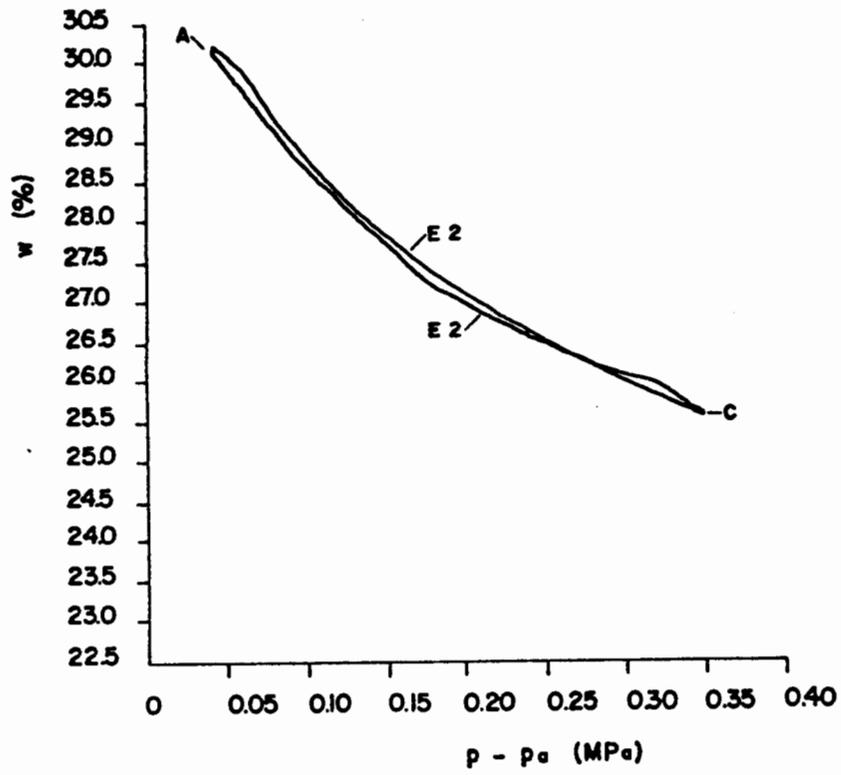


Figura 85ac. Humedad.

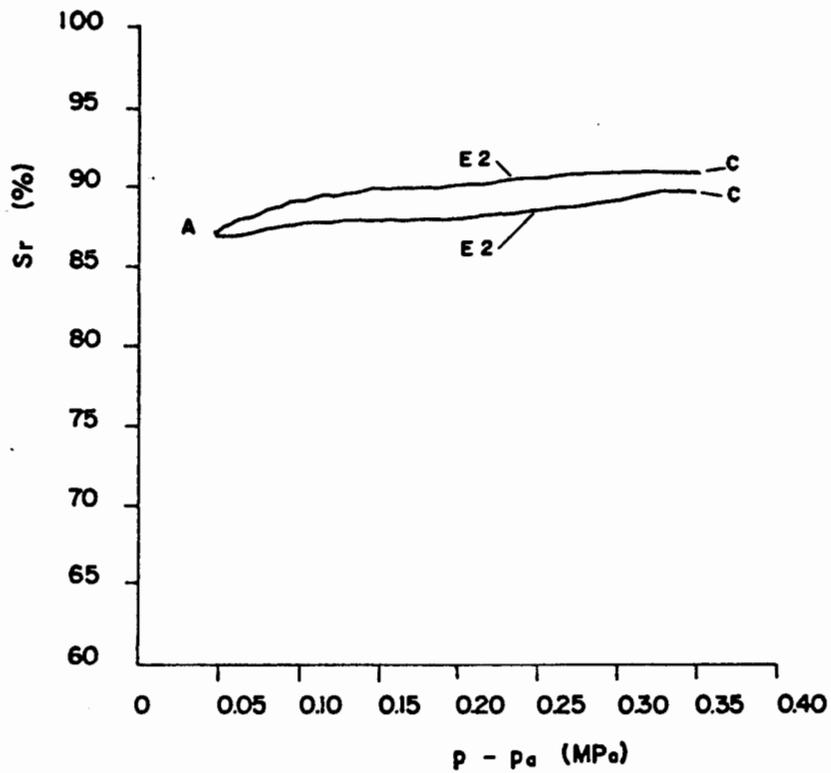


Figura 85ad. Grado de saturación.

Figuras 85a.

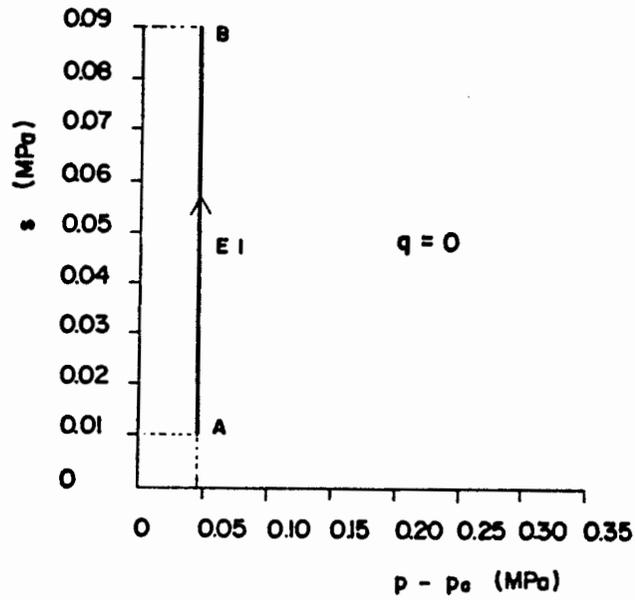


Figura 85ba. Trayectorias tensionales.

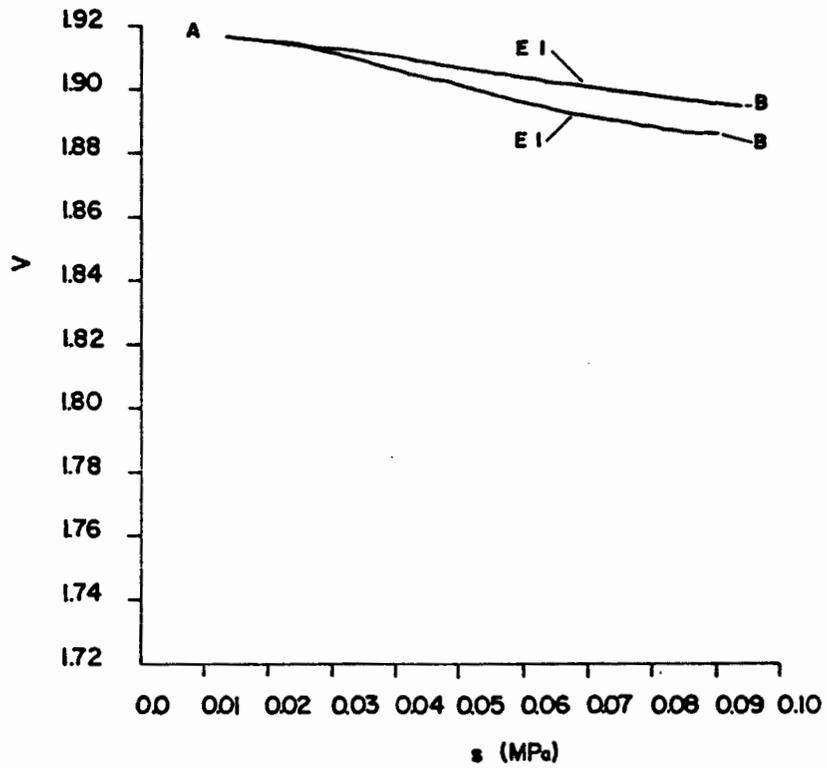


Figura 85bb. Volumen específico.

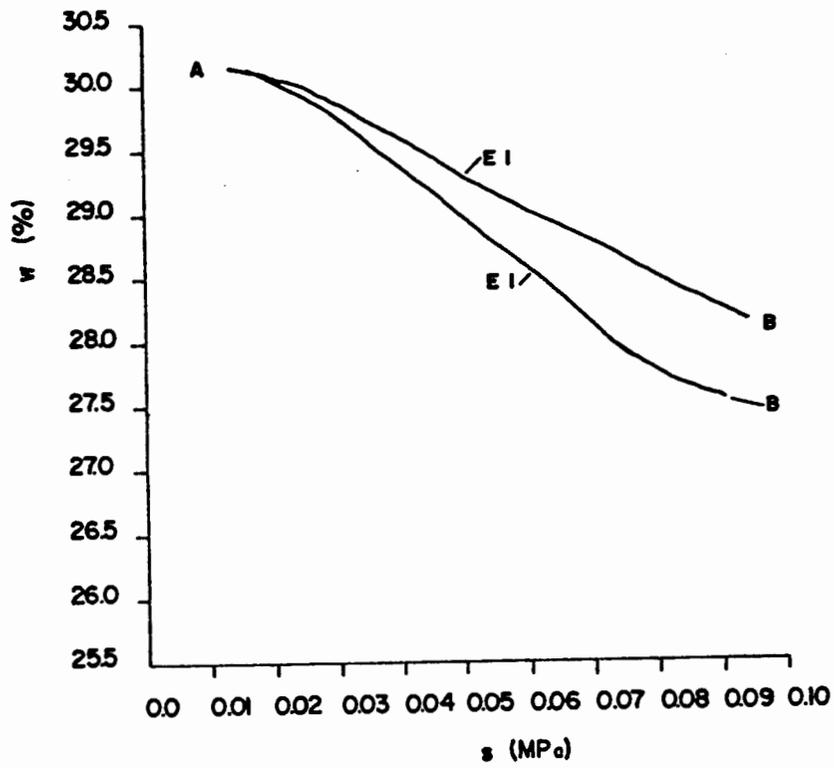


Figura 85bc. Humedad.

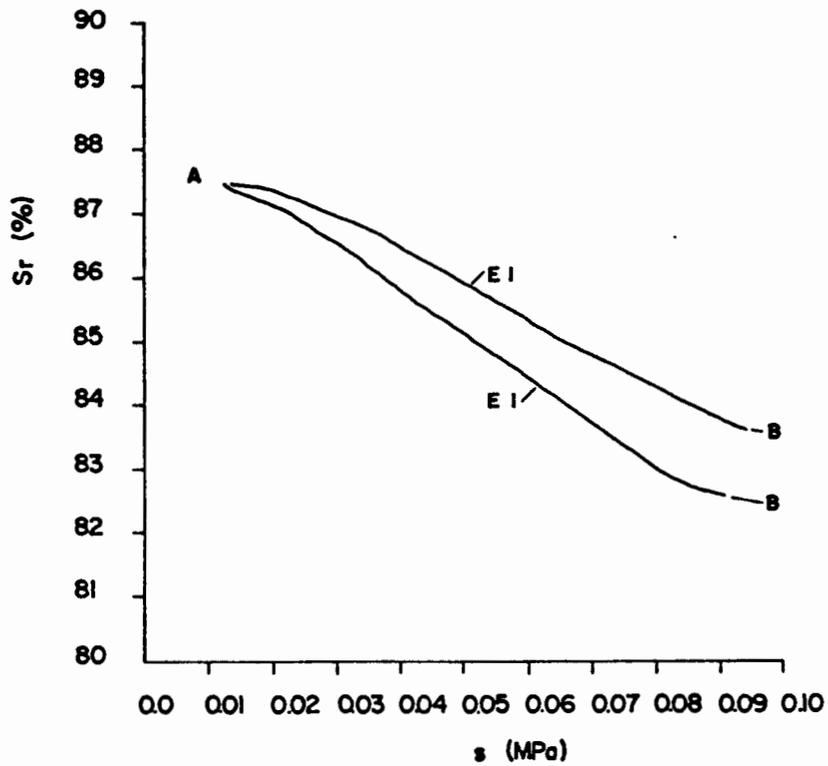


Figura 85bd. Grado de saturación.

Figuras 85b.

Figuras 85. Repetibilidad de los ensayos.

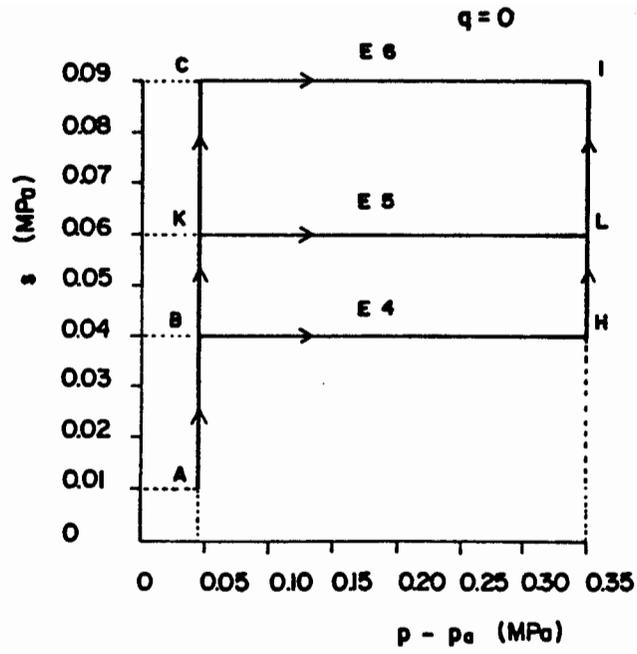


Figura 86a. Trayectorias tensionales.

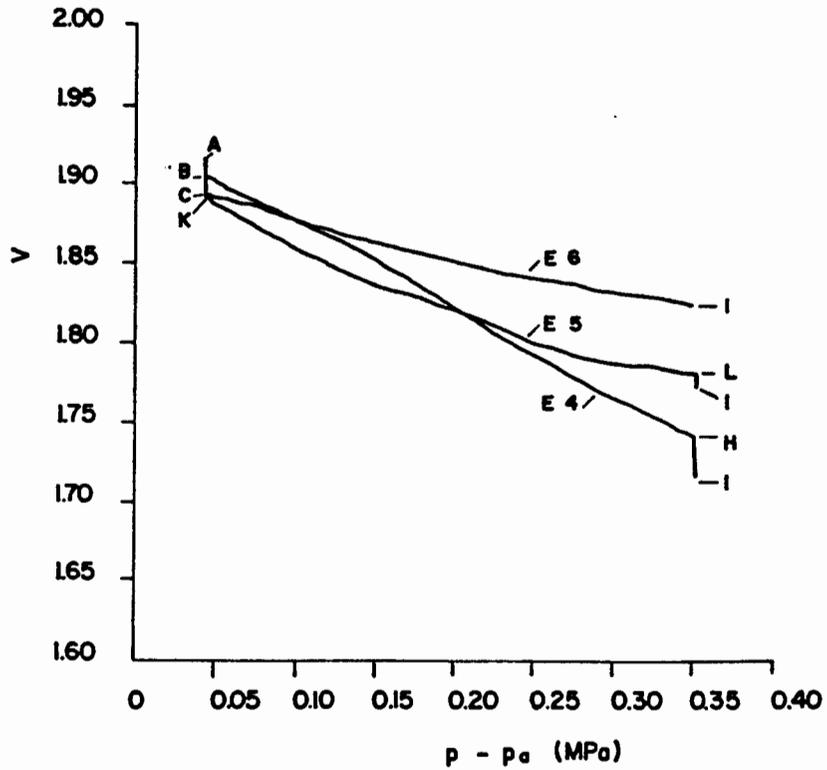


Figura 86b. Volumen específico.

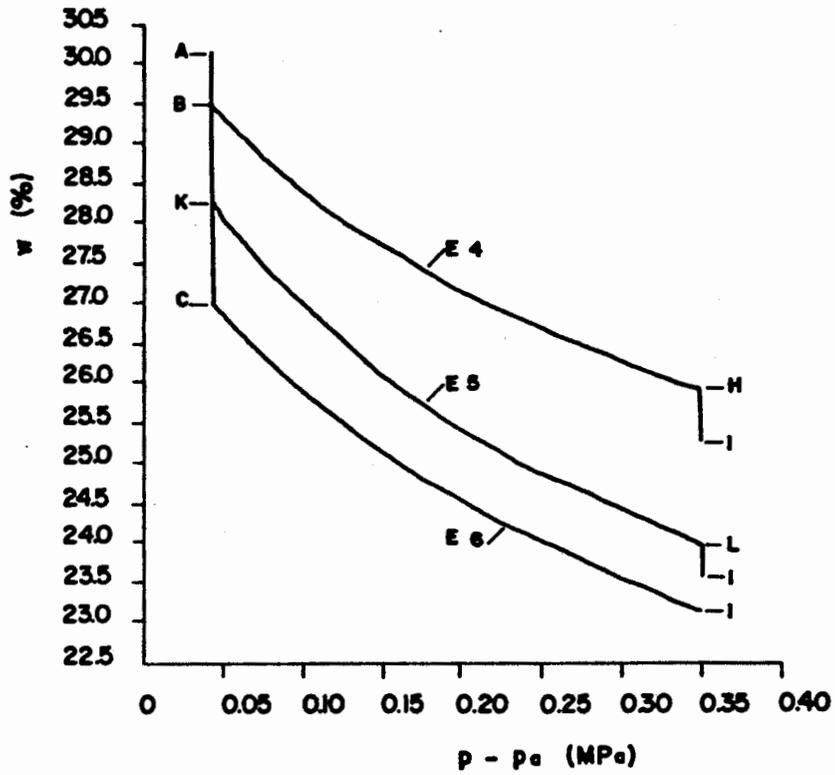


Figura 86c. Humedad.

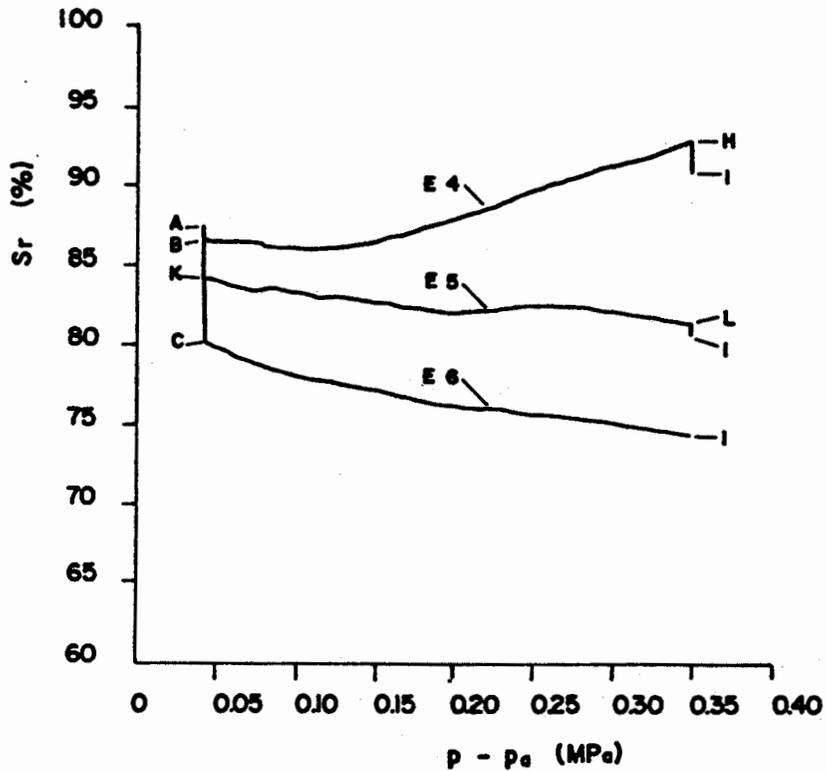


Figura 86d. Grado de saturación.

Figuras 86. Dependencia del estado de las muestras con la trayectoria tensional en procesos con succión creciente y tensión de corte nula.

en mayor medida su grado de saturación. En los tres casos mostrados el estado final de la muestra es diferente en cada trayectoria. Cuanto mayor es la succión en que comienza la variación de la tensión esférica, mayor es el volumen específico y menores la humedad y el grado de saturación finales.

Este mismo comportamiento se ha comprobado en trayectorias en las que se mantiene constante pero no nula la tensión de corte. Estas trayectorias se muestran en la figura 87a en la que se observa que el estado tensional pasa de $p-p_a=0,045$ MPa, $s=0,01$ MPa y $q=0,0$ MPa a $p-p_a=0,35$ MPa, $s=0,09$ MPa y $q=0,05$ MPa, siguiéndose caminos diferentes y correspondiendo el tramo BC a un cambio $dq>0$ con $d(p-p_a)=0$ y $ds=0$ hasta $q=0,05$ MPa. Previamente es necesario seguir la trayectoria AB por cuanto para mantener $p-p_a$ constante en BC al aumentar q , es necesario reducir σ_3 , con lo que si σ_3 en B fuese 0,145 MPa al llegar a C sería 0,128 MPa, lo cual no es conveniente por ser cercano a $p_a=0,1$ MPa y tenerse que cumplir continuamente que $p-p_a>0$. Por esta razón en AB se aumenta σ_3 hasta 0,2 MPa, valiendo consecuentemente en C 0,183 MPa.

Las figuras 87b, c y d muestran el estado de las muestras en las trayectorias CDE y CFE. Para poder observar mejor los resultados se han hecho partir las curvas de v , w y S_r del mismo punto C en los dos ensayos, eliminando las diferencias existentes entre ellos en el tramo ABC debidas a variabilidades de los ensayos. El comportamiento observado y las conclusiones derivadas son análogos a los indicados anteriormente.

En consecuencia siguiendo este tipo de trayectorias el estado final de las muestras es dependiente de la historia tensional correspondiente.

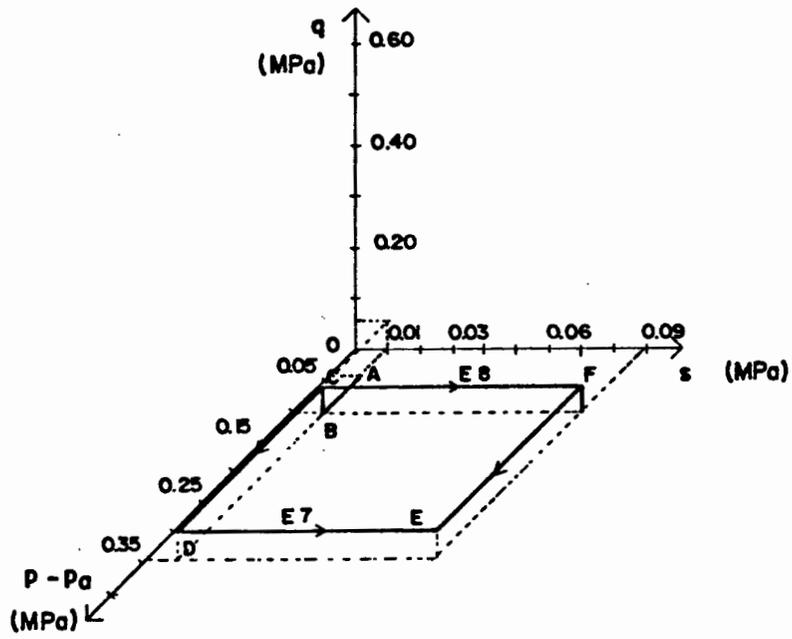


Figura 87a. Trayectorias tensionales.

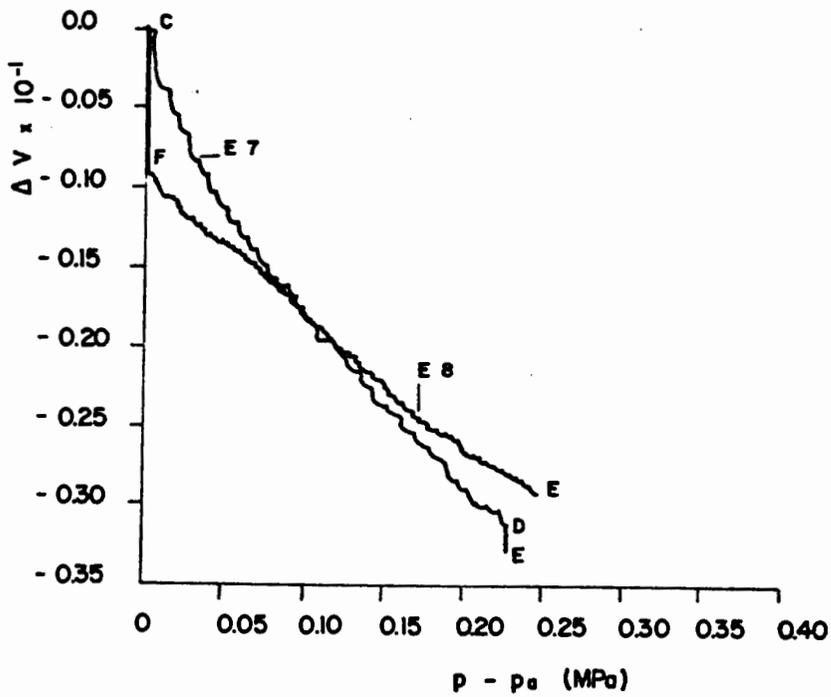


Figura 87b. Volumen específico.

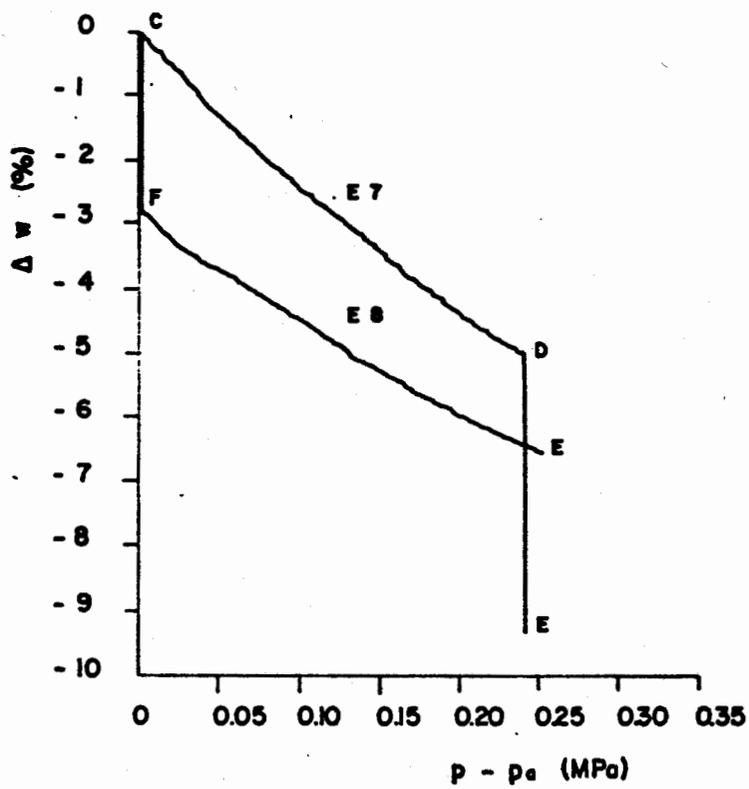


Figura 87c. Humedad.

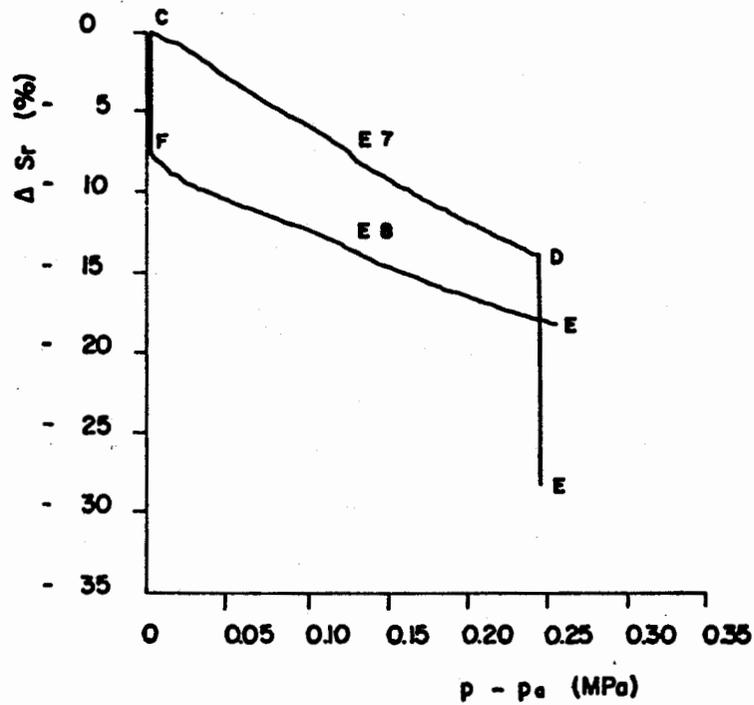


Figura 87d. Grado de saturación.

Figuras 87. Dependencia del estado de las muestras con la trayectoria tensional en procesos con succión creciente y tensión de corte constante y no nula.

Se han realizado adicionalmente otros ensayos para comprobar esta dependencia en trayectorias que incluyan procesos monótonos de disminución de la succión y aumento de la tensión esférica. Debido a que en el estado inicial de la muestra no es posible disminuir la succión, las trayectorias seguidas incluyen como primera variación tensional el aumento de la succión hasta $s=0,09$ MPa para poderla reducir posteriormente. A partir de dicho punto se han seguido trayectorias diferentes incluyendo puntos comunes a varias de ellas (figura 88a) para poder comparar en dichos puntos el estado de las muestras. Las figuras 88b, c y d muestran el estado de las muestras en estos ensayos, indicándose los puntos E y H que son los que están en el mismo estado tensional en dos de los ensayos presentados (figura 88a).

La trayectoria ACF es común a las ACFD y ACIG, por lo que los resultados debieran coincidir en ellas en ambos casos. Las diferencias existentes corresponden a las propias variabilidades de los ensayos tal y como se ha mostrado en las figuras 85. Como se observa en las figuras 88b, c y d los puntos E y H correspondientes a cada trayectoria coinciden sensiblemente en el caso del volumen específico. En el caso de la humedad y del grado de saturación la coincidencia es menos clara. Se observa, sin embargo, en este caso, que la curva correspondiente a la trayectoria ACBJ tiende a intersectar sucesivamente a las correspondientes a las trayectorias ACFD y ACIG, contrariamente a lo que ocurría en el caso de incremento de succión (figuras 86 y 87) en las que la separación entre las diferentes curvas era progresivamente mayor. Se ha considerado, por ello, que existe unicidad en los estados de las muestras en los puntos E y H en ambos ensayos y, consecuentemente, que estos estados no dependen, en este tipo de trayectorias, de la historia tensional seguida.

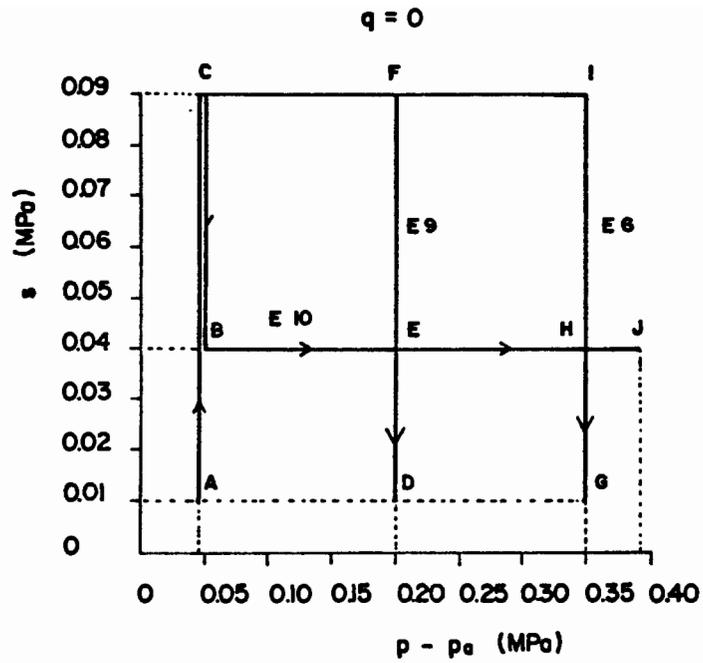


Figura 88a. Trayectorias tensionales.

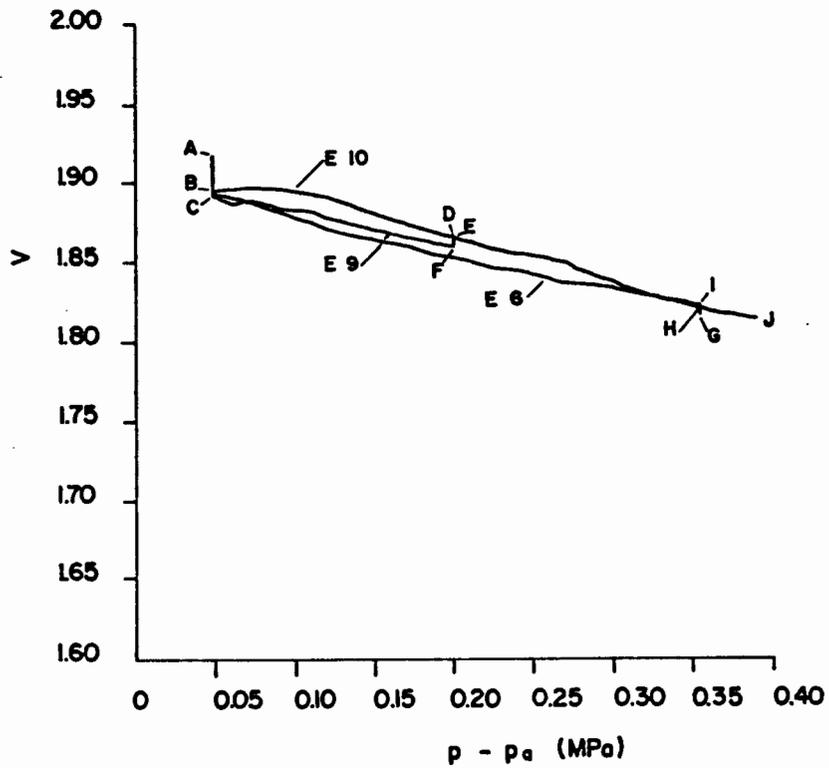


Figura 88b. Volumen específico.

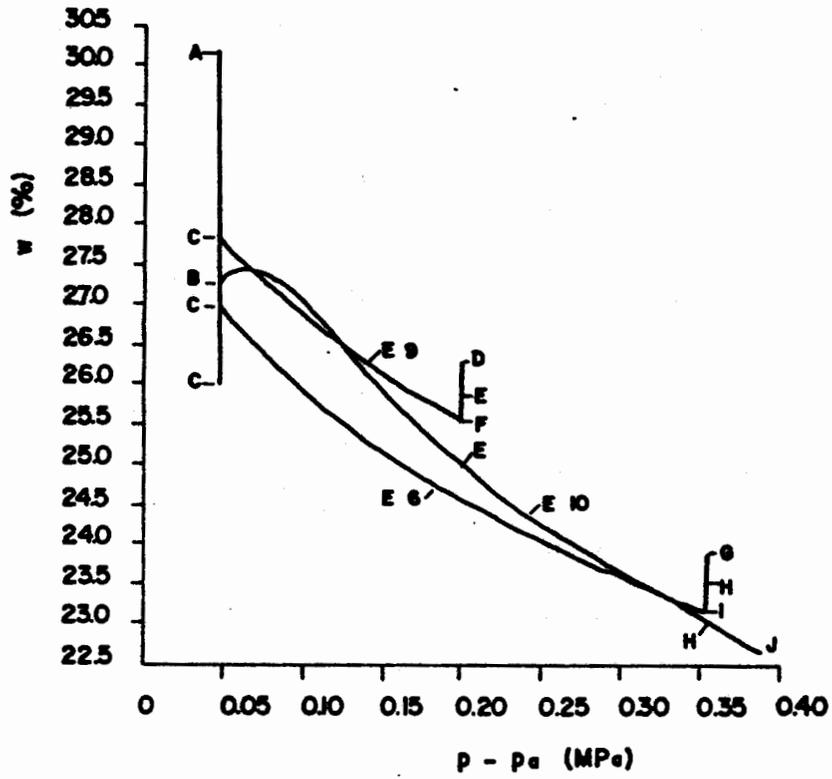


Figura 88c. Humedad.

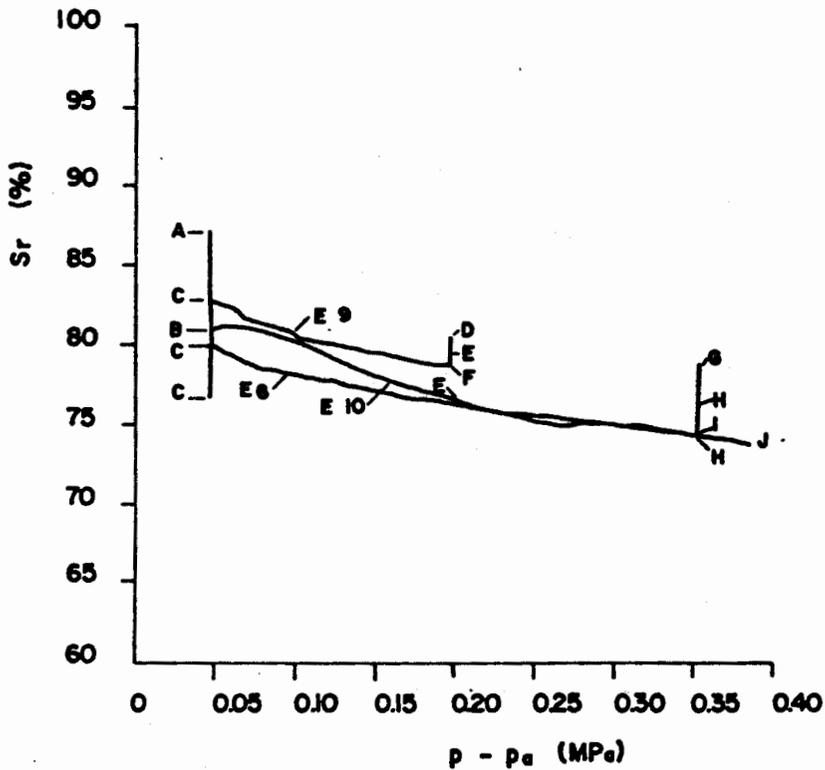


Figura 88d. Grado de saturación.

Figuras 88. Dependencia del estado de las muestras con la trayectoria tensional en procesos con succión decreciente.

Se ha comprobado asimismo la diferencia entre el comportamiento de la muestra en las trayectorias ACBJ y ABJ (figura 89a), es decir aplicando previamente o no un estado de succión superior al correspondiente al de aumento de la tensión esférica. En los resultados obtenidos (figuras 89b, c y d) se observa que la muestra que previamente ha sido sometida a una mayor succión se comporta inicialmente con más rigidez que la otra, variando menos tanto el volumen específico como la humedad y el grado de saturación. Posteriormente la rigidez es similar en ambos casos. Esto indica que el incremento inicial de la succión ha producido un cierto efecto de sobreconsolidación del suelo. Una vez que la tensión esférica es suficientemente elevada el comportamiento de las dos muestras es análogo. Este efecto es comentado con más amplitud en el siguiente apartado.

4.5.2.2. Compresibilidad del suelo ante cambios en la tensión esférica

El comportamiento del suelo al variar la tensión esférica, manteniendo constante la succión, se puede considerar análogo cualitativamente al del suelo saturado, tal y como se comprueba, por ejemplo, en las figuras 90 en un caso con $s=0,01$ MPa. Como se observa, este comportamiento puede ser representado para el volumen específico, la humedad y el grado de saturación, a partir de la curva de aumento noval de la tensión esférica, en la que el suelo es menos rígido produciéndose deformaciones irrecuperables, y de las curvas de descarga y posterior carga, en las que el suelo es más rígido y las deformaciones son recuperables.

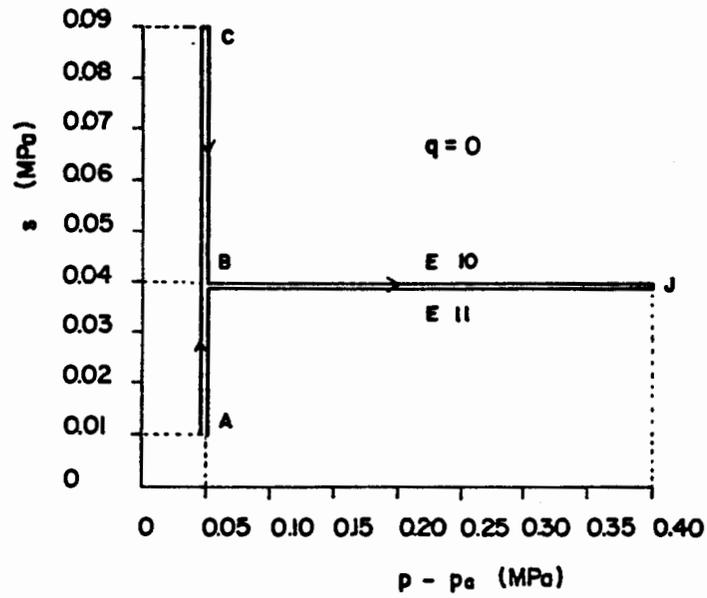


Figura 89a. Trayectorias tensionales.

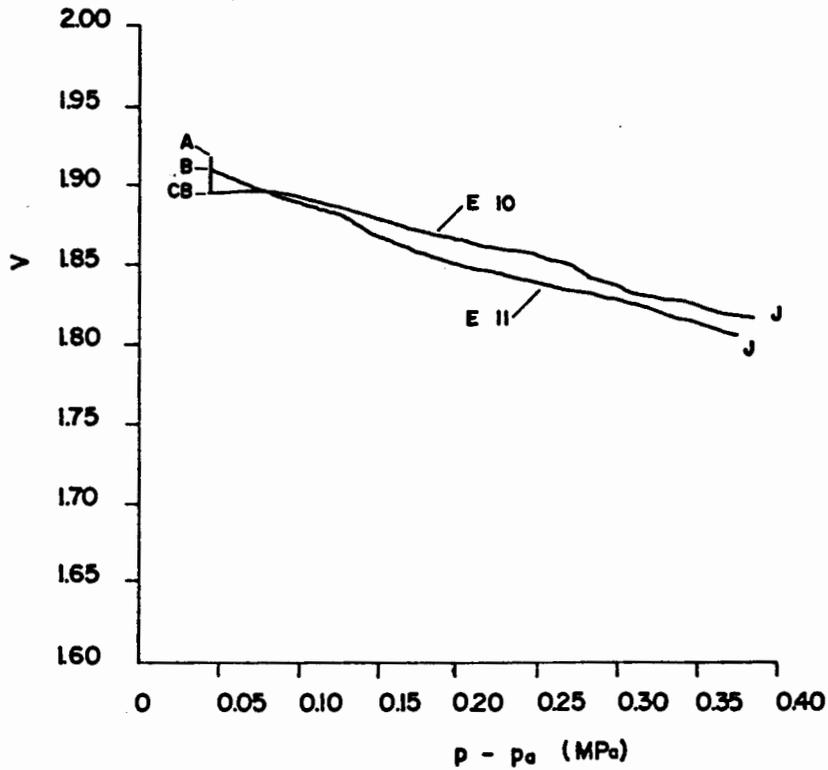


Figura 89b. Volumen específico.

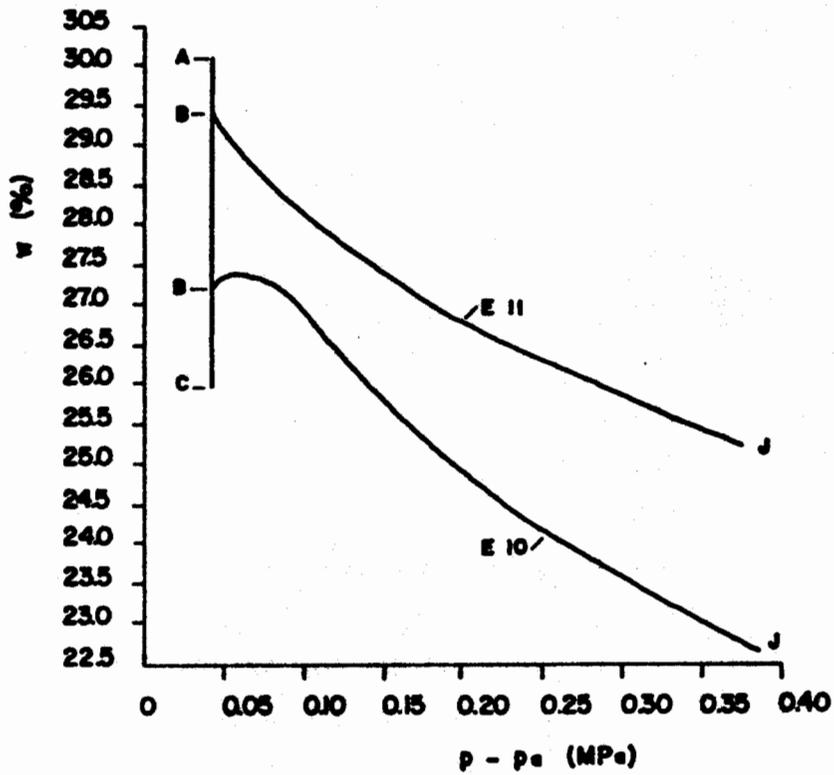


Figura 89c. Humedad.

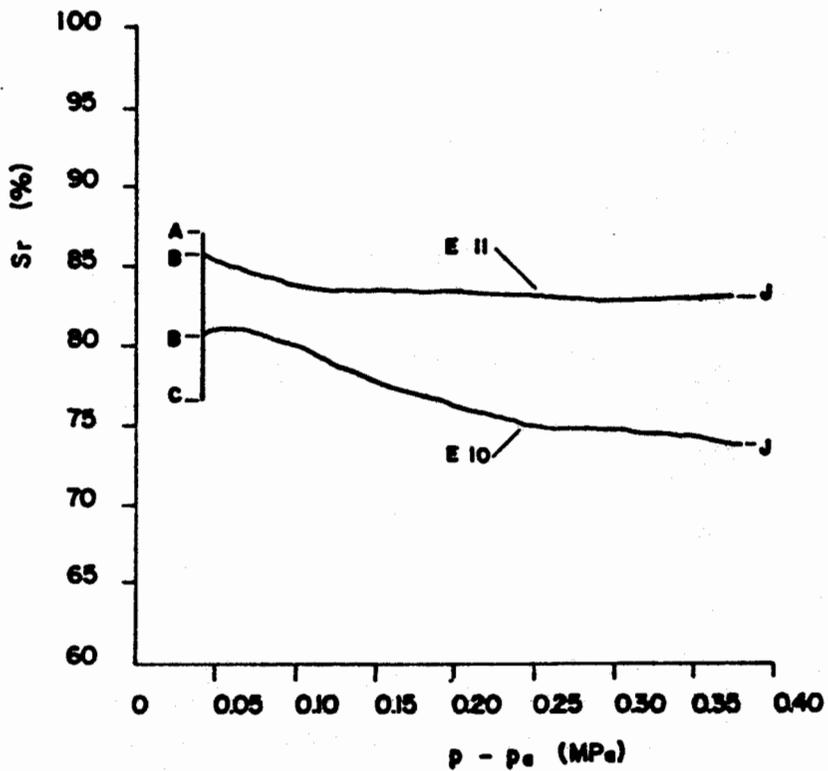


Figura 89d. Grado de saturación.

Figuras 89. Influencia de incrementos previos de la succión sobre el comportamiento de las muestras.

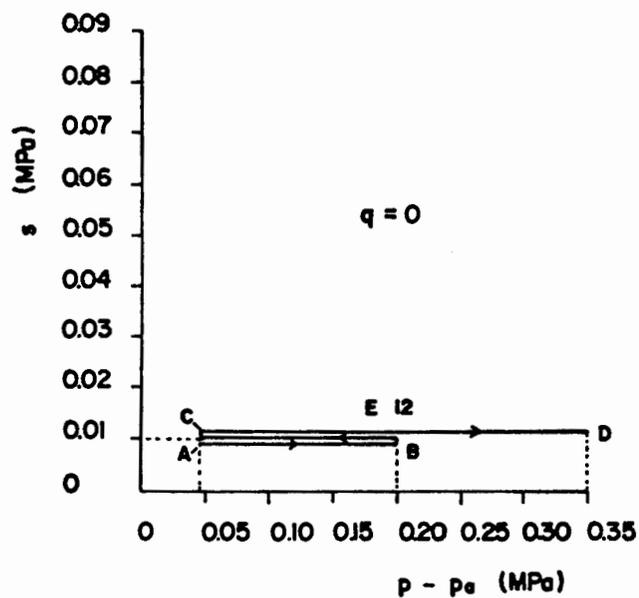


Figura 90a. Trayectoria tensional.

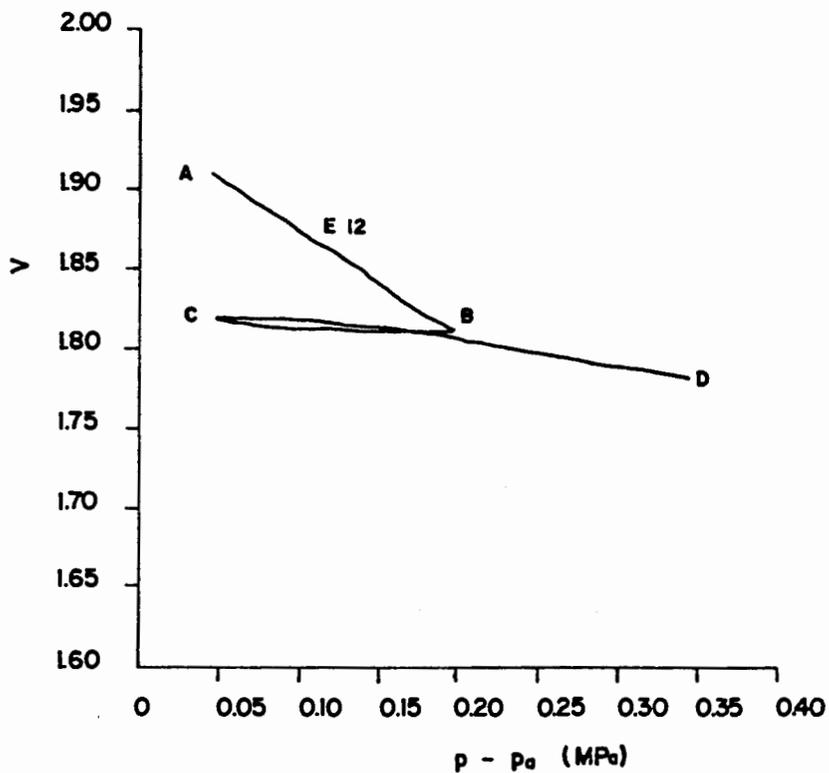


Figura 90b. Volumen específico.

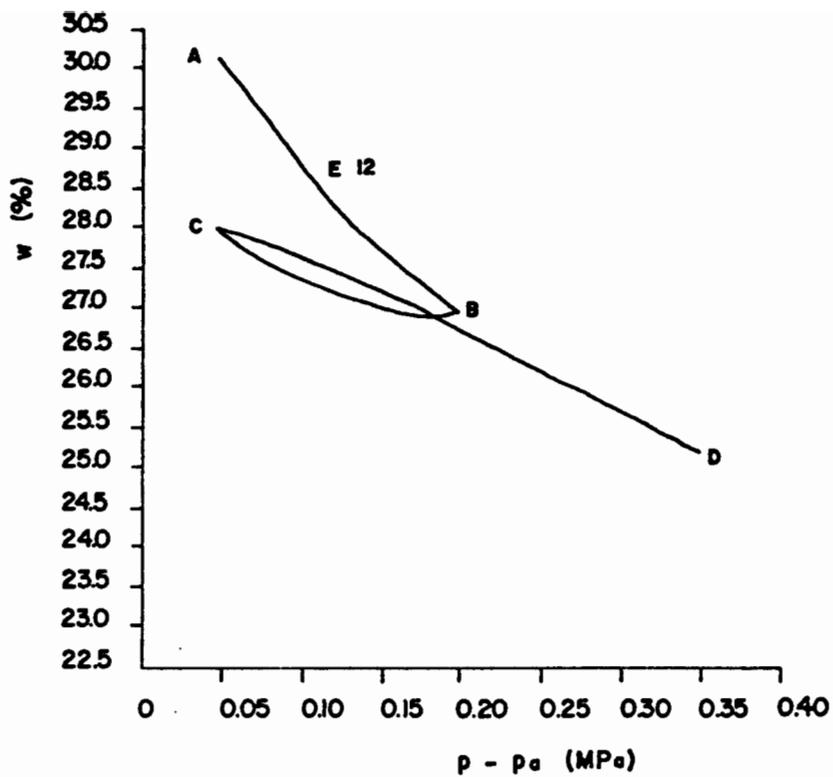


Figura 90c. Humedad.

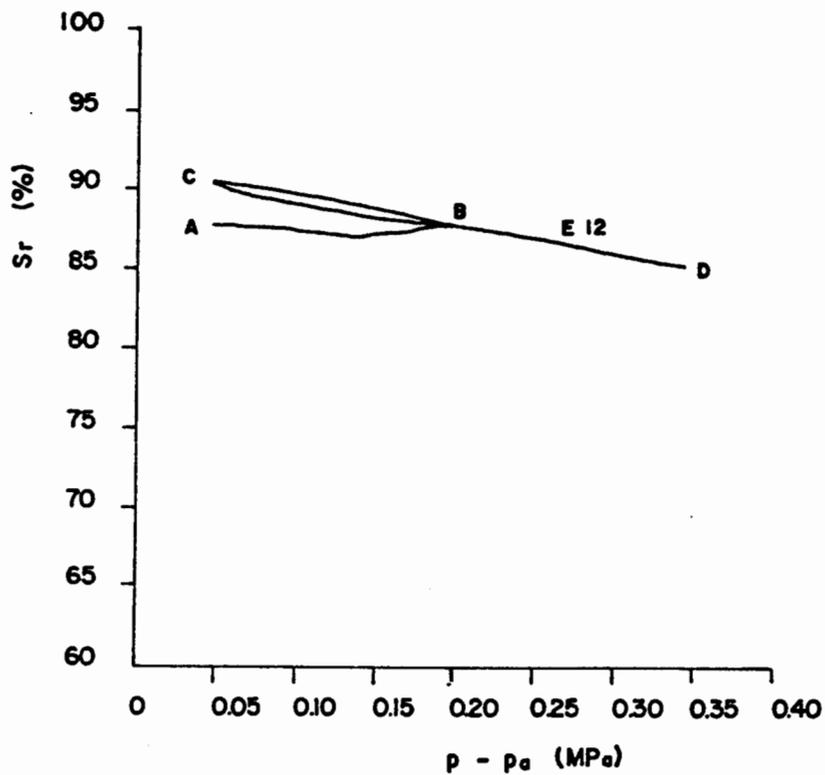


Figura 90d. Grado de saturación.

Figuras 90. Comportamiento del suelo ante cambios en la tensión esférica a succión constante.

Para estudiar el tipo de expresiones matemáticas adecuadas que relacionen el volumen específico de la muestra y la tensión esférica aplicada a succión constante, se ha representado gráficamente para varios ensayos el parámetro λ anteriormente definido. La representación de este parámetro permite, además de comprobar la validez de esta relación, conocer el estado de sobreconsolidación de la muestra correspondiente en procesos en que se incremente monótonamente la tensión esférica. De esta forma si λ permanece sensiblemente constante en todo el intervalo de tensiones aplicado, dicha relación puede considerarse correcta y la muestra se encuentra en estado normalmente consolidado o en estado sobreconsolidado en todo el intervalo. Por el contrario, si la muestra está inicialmente sobreconsolidada, λ deberá ser menor al comienzo (comportamiento más rígido) y aumentará posteriormente hasta llegar al valor correspondiente a la recta noval. La tensión esférica en la zona de transición entre ambos valores de λ indicará la presión de preconsolidación a la que ha sido sometida la muestra. Por otro lado, si λ no permanece constante en cada una de las zonas indicadas será indicio de que la relación logarítmica supuesta no es adecuada.

Se han considerado inicialmente unas expresiones del tipo $v=N-\lambda \cdot \ln(p-x)$, con x arbitrario, para comprobar la variabilidad de la uniformidad de λ al cambiar x , y ver si se obtiene la mejor aproximación (λ constante) en $x=p_u$. En las figuras 91 se muestra un caso correspondiente a un incremento de p desde 0,145 MPa hasta 0,45 MPa con $s=0,01$ MPa. x se ha hecho valer, sucesivamente, 0 MPa, 0,05 MPa, 0,1 MPa, 0,125 MPa y 0,14 MPa (se debe cumplir en este caso que $x < 0,145$ para que $p-x > 0$ durante toda la trayectoria de tensiones). Como se observa en la figura 91b, la pendiente media de λ va variando desde ser positiva para $x=0$ MPa o $x=0,05$ MPa a ser negativa en $x=0,125$ MPa y 0,14 MPa. Para $x=0,1$ MPa λ permanece sensiblemente constante en todo el intervalo de tensiones.

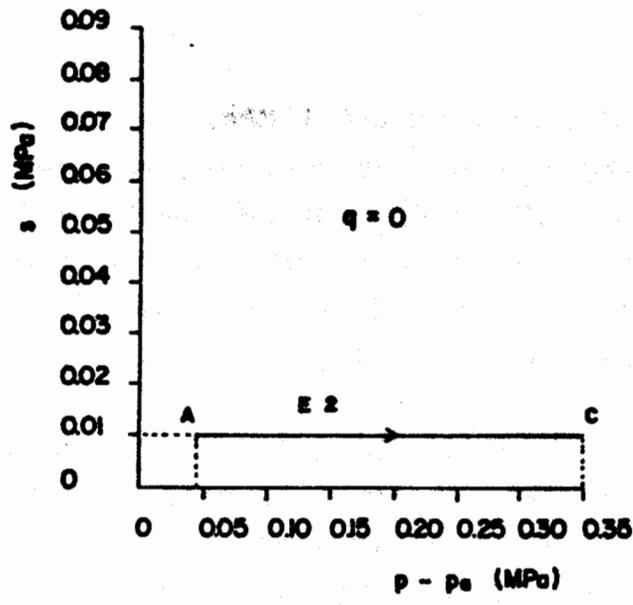


Figura 91a. Trayectoria tensional.

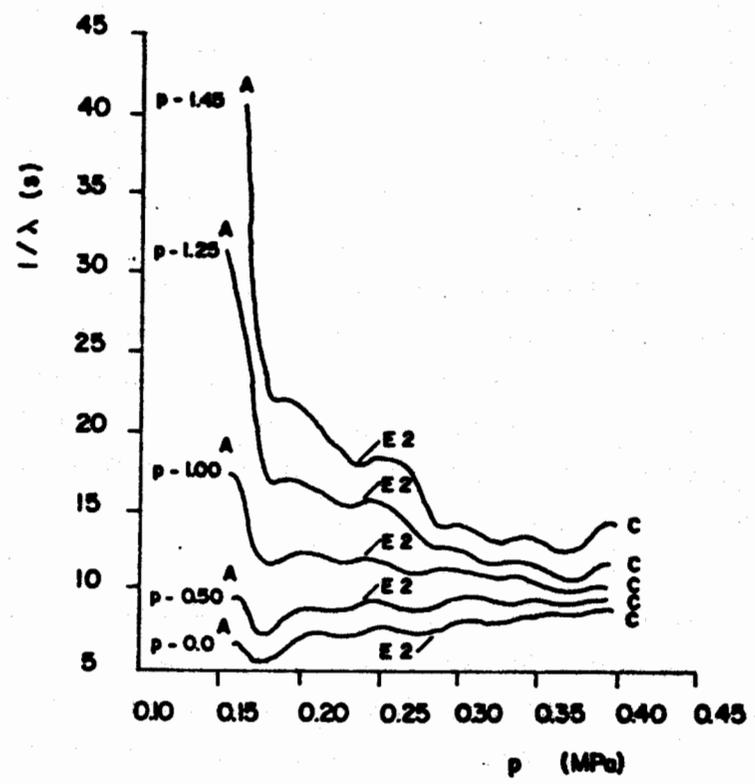


Figura 91b. Resultados.

Figuras 91. Representación del parámetro λ para varios valores de x en una trayectoria de incremento de la tensión esférica a succión constante.

Esta uniformidad de λ en $x=0,1$ MPa, análoga a la obtenida en otros ensayos como más adelante se observa, indica, asimilando $x=0,1$ MPa a p_u , que la expresión $v=N-\lambda \cdot \ln(p-p_u)$ modela correctamente en este caso la respuesta del suelo. Para las ramas de descarga se puede suponer asimismo una ley del tipo $v=v_k-k \cdot \ln(p-p_u)$.

Para comprobar el efecto de la succión sobre la compresibilidad del suelo al cambiar la tensión esférica se ha representado gráficamente λ para los ensayos descritos en la figura 86. La figura 92 muestra los resultados obtenidos en los que se confirma de nuevo que λ es sensiblemente constante en cada caso para tensiones esféricas suficientemente elevadas, existiendo en cada uno de ellos un cierto grado de sobreconsolidación inicial variable. Se comprueba asimismo que λ es menor cuanto más alta es la succión a la que se incrementa la tensión esférica, es decir, la succión aumenta en este rango tensional la rigidez del suelo. Por otro lado la sobreconsolidación de las muestras depende también de la succión correspondiente, observándose que se incrementa con ella (mayor rigidez y mayor presión de preconsolidación). De acuerdo con estas figuras los valores de λ y de la presión de preconsolidación para succiones de 0,04 MPa, 0,06 MPa y 0,09 MPa, son, respectivamente, del orden de 0,1 y 0,14 MPa, 0,075 y 0,16 MPa y 0,06 y 0,18 MPa.

En consecuencia, de estos resultados se concluye que λ depende de la succión de forma que al aumentarla el suelo se comporta con más rigidez (λ menor) en los intervalos tensionales utilizados. De acuerdo con ello se puede expresar:

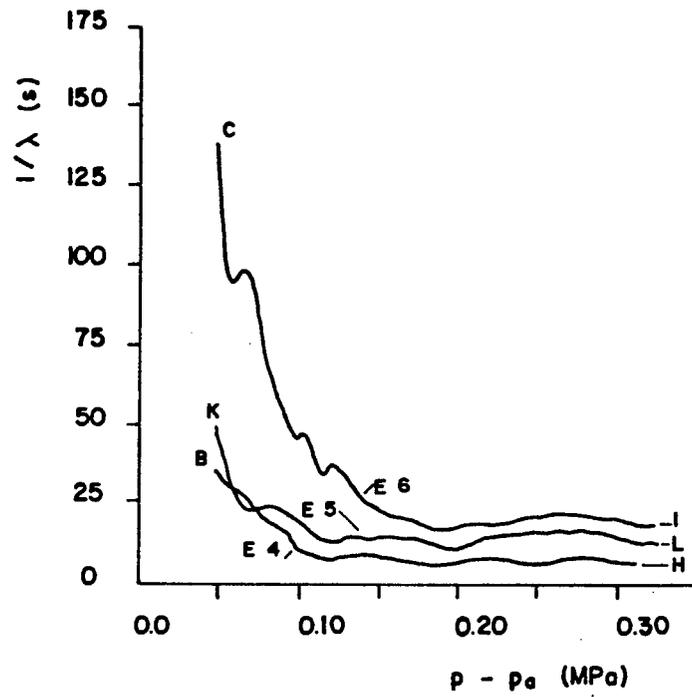


Figura 92. Variación de la compresibilidad del suelo con la succión ante incrementos de la tensión esférica.

$$\frac{dv}{v} = -\lambda(s) \cdot \frac{d(p-p_a)}{p-p_a}$$

Para integrar esta expresión y obtener la ecuación correspondiente a las rectas noales del suelo es necesario determinar si N es constante o si depende también de la succión, es decir, si las curvas noales para cada succión convergen o no en un solo punto en $p-p_a=1,0$. Para ello se puede hacer uso de los resultados presentados en la figura 86. De acuerdo con ellos, sin embargo, es difícil determinar con fiabilidad si esta dependencia existe o no. Por esta razón se ha considerado el caso más general, en primera aproximación, haciendo depender a N de s :

$$v=N(s)-\lambda(s) \cdot \ln(p-p_a)$$

Este tema se vuelve a tratar en el siguiente capítulo.

La figura 93 muestra otro comportamiento significativo correspondiente a los ensayos de las figuras 89 representando en este caso λ en la trayectoria BJ común. Como se observa, la muestra que sigue la trayectoria ACBJ, en la que se aplica una carga y descarga de succión entre 0,04 MPa y 0,09 MPa, presenta un grado de sobreconsolidación superior a la que sigue la trayectoria ABJ, en la que no se aplica dicha carga y descarga. De ello se deduce que este incremento de succión aumenta el grado de sobreconsolidación del suelo. Una vez se llega a la curva noal, sin embargo, ambas muestras se comportan con igual rigidez, tal y como se comprueba en la figura 93 al ser el valor final de λ análogo. De acuerdo con esta figura, mientras la muestra que sigue la trayectoria ACBJ presenta una presión de preconsolidación del orden de 0,18 MPa, en la que sigue la trayectoria ABJ esta presión es del orden de 0,14 MPa.

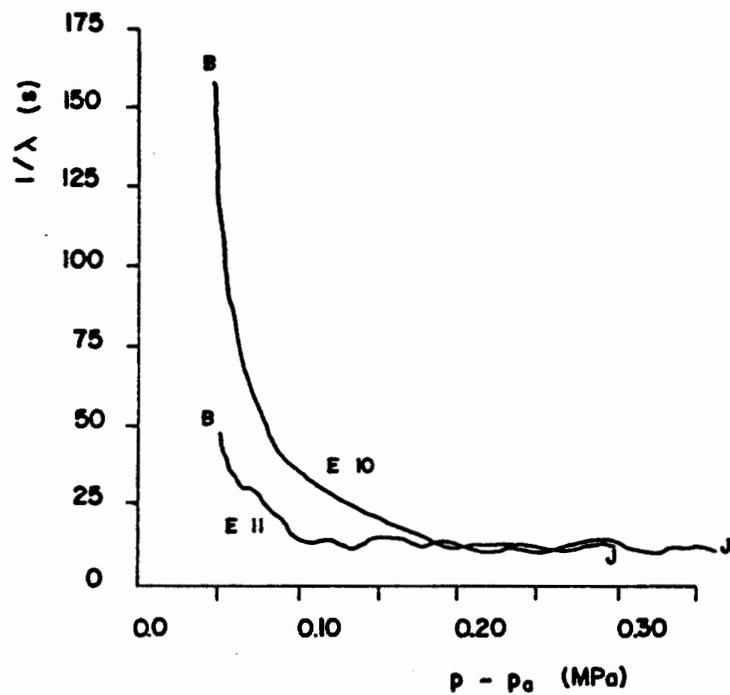


Figura 93. Efecto de sobreconsolidación producido por incrementos de la succión.

De todo ello se concluye que el suelo se comporta ante incrementos de la tensión esférica con una rigidez en la curva noval directamente relacionada con la succión que se aplica, afectando también la historia de succiones previa a su grado de sobreconsolidación.

En las figuras 94 se presentan los resultados de otro ensayo en el que se ha seguido una trayectoria tensional cerrada (figura 94a) que comienza y finaliza en $p-p_a=0,045$ MPa y $s=0,01$ MPa. Esta trayectoria incluye, sucesivamente, incrementos y disminuciones de $p-p_a$ y de s . En las figuras 94b, c y d se muestran los resultados obtenidos en términos de v , w , S_r respectivamente, en los que se observa la menor variación de estos parámetros en la rama de descarga de la tensión esférica (tramo LA) respecto al proceso previo de carga (tramo BK), así como la prácticamente nula variación de v al reducir la succión en el tramo KL.

Se ha realizado, adicionalmente, un ensayo a succión nula para observar el comportamiento del suelo en estado saturado. Este ensayo no se pudo realizar de forma análoga a los demás debido a que en este caso se cumple que la presión de aire coincide con la presión de agua pudiéndose producir, en consecuencia, flujos de agua a través del conducto correspondiente a la presión de aire.

Para asegurar el mismo estado y estructura inicial de la muestra, su fabricación fue análoga a los demás ensayos pese a que de esta forma se obtiene un grado de saturación menor que 1. Con el fin de hacer tender a la saturación al suelo se mantuvo abierto al aire el conducto correspondiente a p_a , aplicando una presión intersticial de agua de 0,1 MPa con una tensión esférica de 0,045 MPa durante las 24 horas iniciales de consolidación. Se controló en este periodo la expulsión de aire y agua a través de dicho conducto hasta la estabilización del

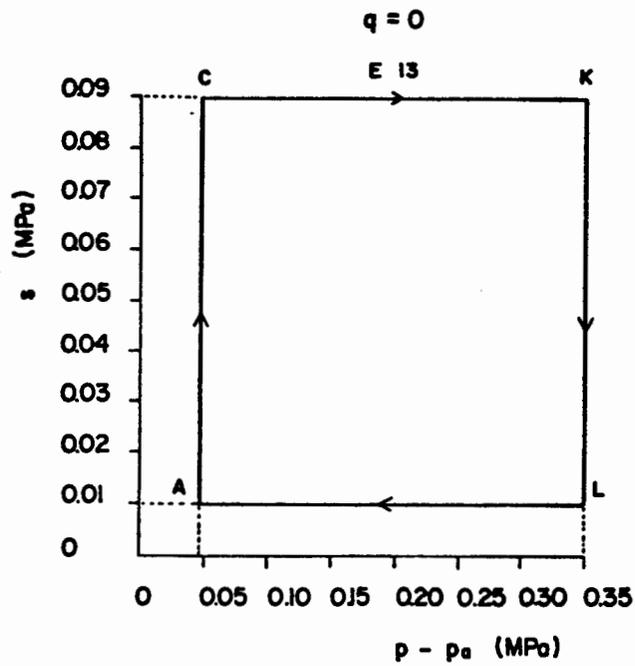


Figura 94a. Trayectoria tensional.

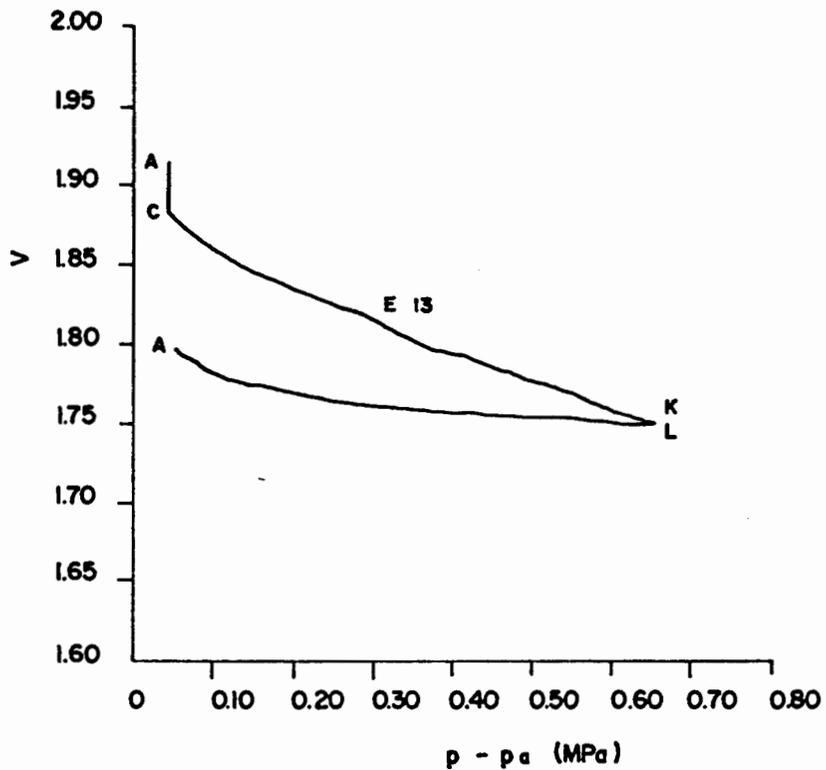


Figura 94b. Volumen específico.

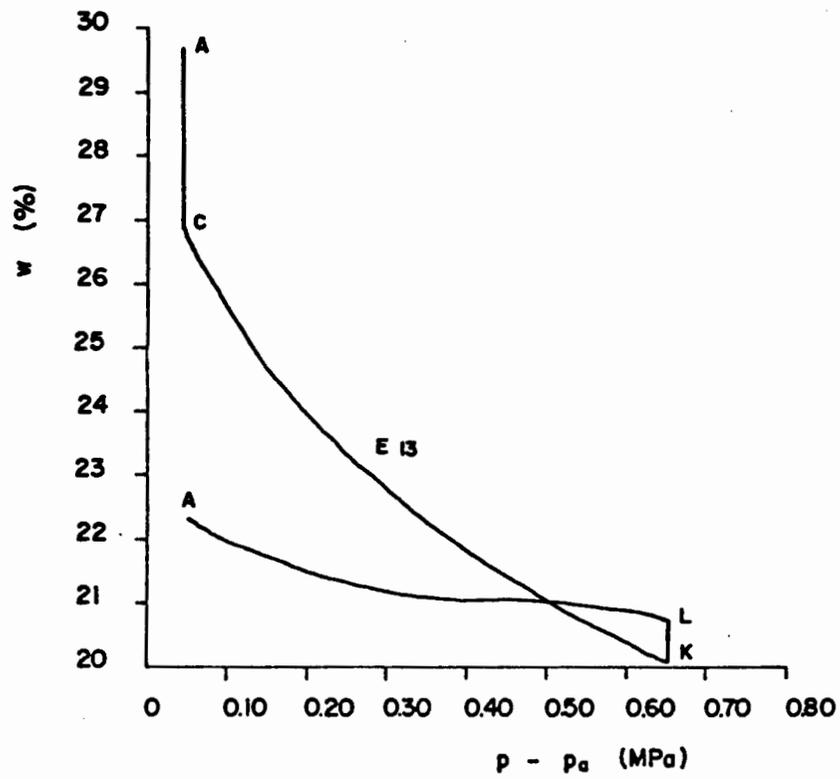


Figura 94c. Humedad.

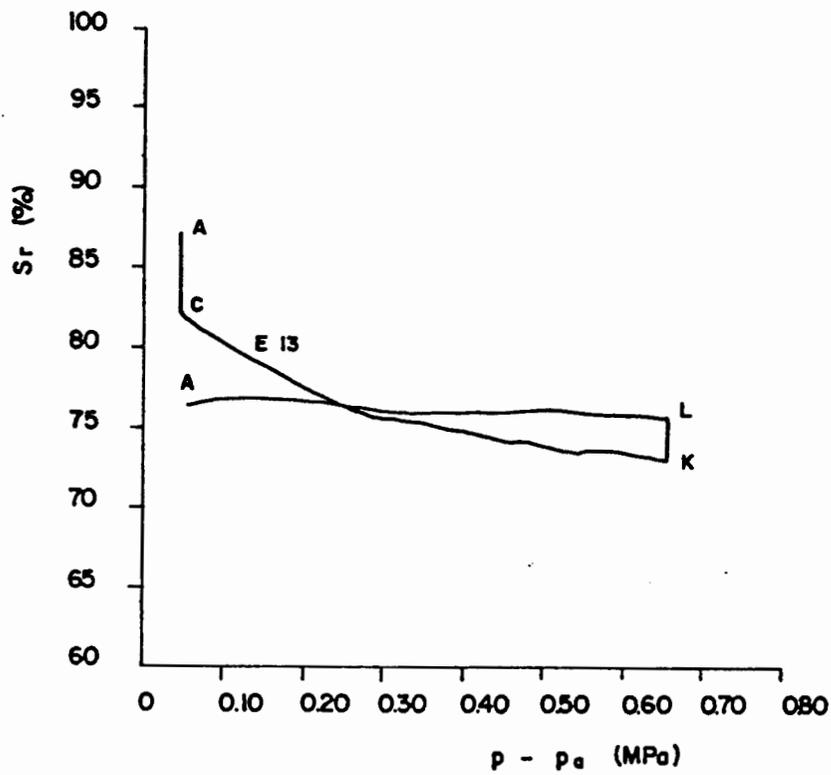


Figura 94d. Grado de saturación.

Figuras 94. Comportamiento del suelo en una trayectoria tensional cerrada del plano (p-p_a, s).

proceso sin expulsión de aire. Aunque con este flujo se puede producir alguna alteración de la estructura de la muestra, este procedimiento fue el único factible para saturar al suelo partiendo del mismo estado inicial que en los otros ensayos. Tras estas 24 horas se cerró el conducto de p_a y se mantuvo $p_v=0,1$ MPa. No se controló en este ensayo la variación del volumen de agua intersticial, impidiendo el cálculo de w y S_r , debido a la existencia de este flujo inicial tanto de aire como de agua, que no fue medido. Se consideró que con este procedimiento la muestra quedaba en un estado saturado o cercano a él.

Tras este proceso inicial se sometió al suelo a un incremento de la tensión esférica hasta $p-p_a=p-p_v=0,35$ MPa. Las figuras 95a, b y c muestran, respectivamente, la trayectoria tensional seguida, la respuesta deformacional durante dicho incremento y los valores de λ obtenidos en él. Como se observa, el valor de λ en este caso es del orden de 0,14.

4.5.2.3. Compresibilidad del suelo ante cambios en la succión

Las figuras 96 muestran el comportamiento deformacional del suelo al ser éste sometido a incrementos de succión hasta 0,09 MPa desde su estado inicial ($p-p_a=0,045$ MPa y $s=0,01$ MPa) y posteriormente a ciclos sucesivos de disminución y aumento de succión entre 0,09 MPa y 0,01 MPa manteniendo en todos los casos constante la tensión esférica. Como se observa, este comportamiento puede ser descrito de forma análoga a lo realizado en el apartado anterior, es decir, con una rama noval de carga en la que la muestra se comporta con menor rigidez y se producen deformaciones irreversibles, y con ramas de descarga y recarga en las que el comportamiento es más rígido y no se producen deformaciones irreversibles.

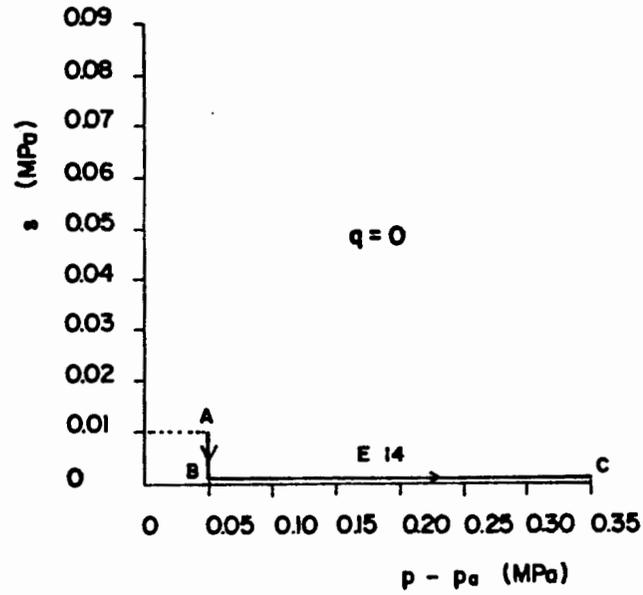


Figura 95a. Trayectoria tensional.

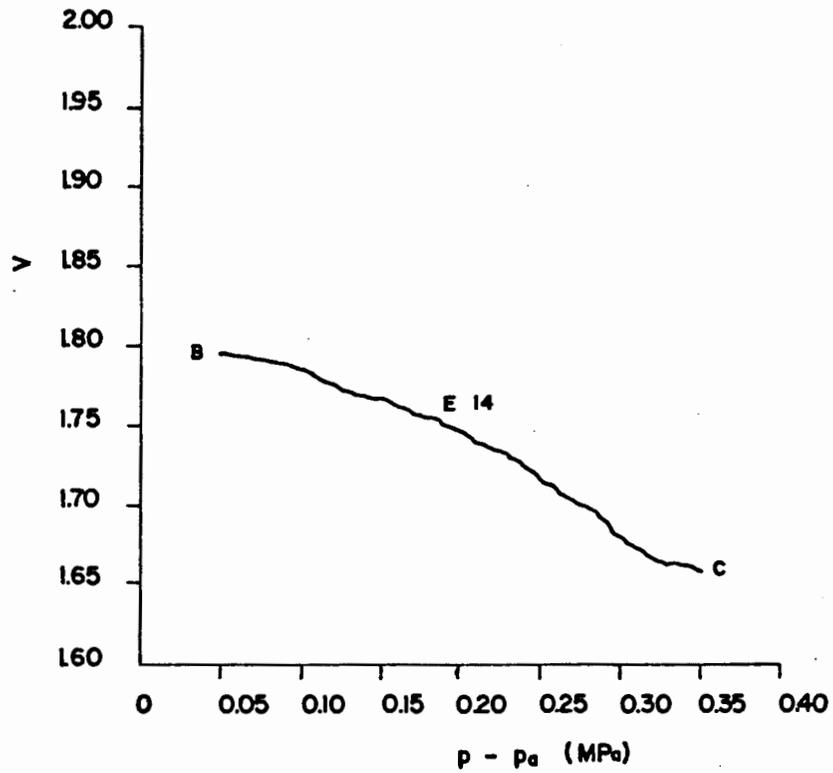


Figura 95b. Volumen específico.

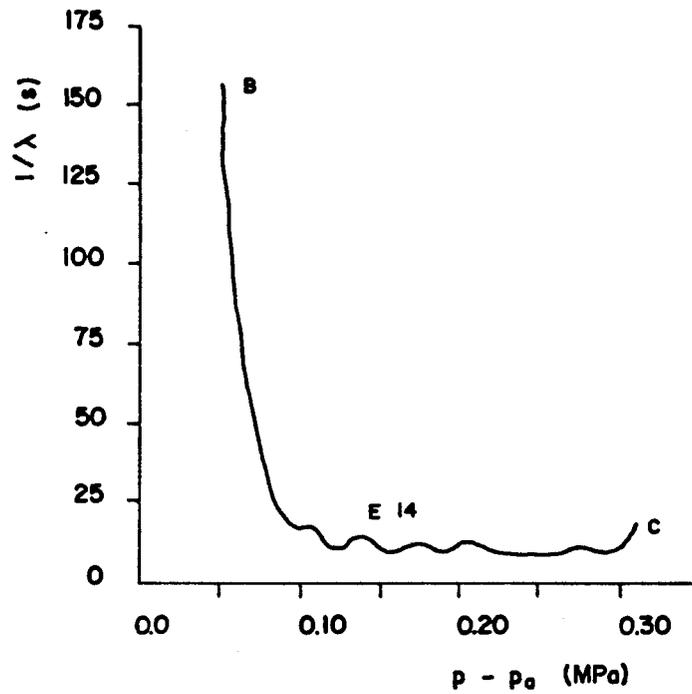


Figura 95c. Parámetro $\lambda(0)$.

Figuras 95. Compresibilidad del suelo ante incrementos de la tensión esférica a succión nula.

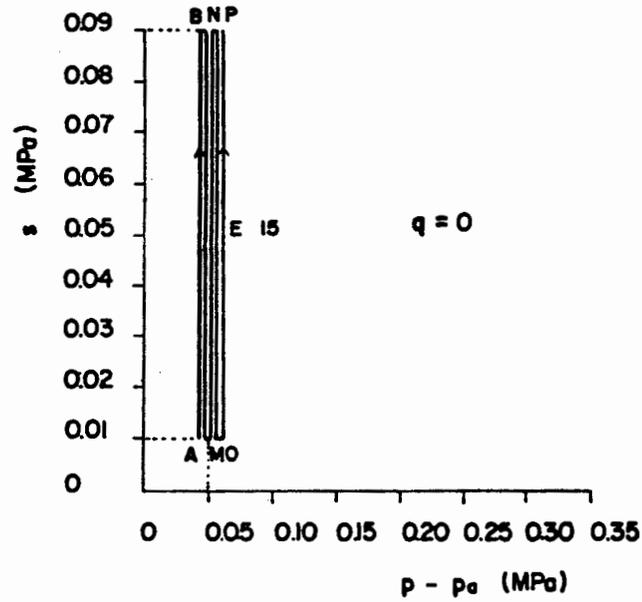


Figura 96a. Trayectoria tensional.

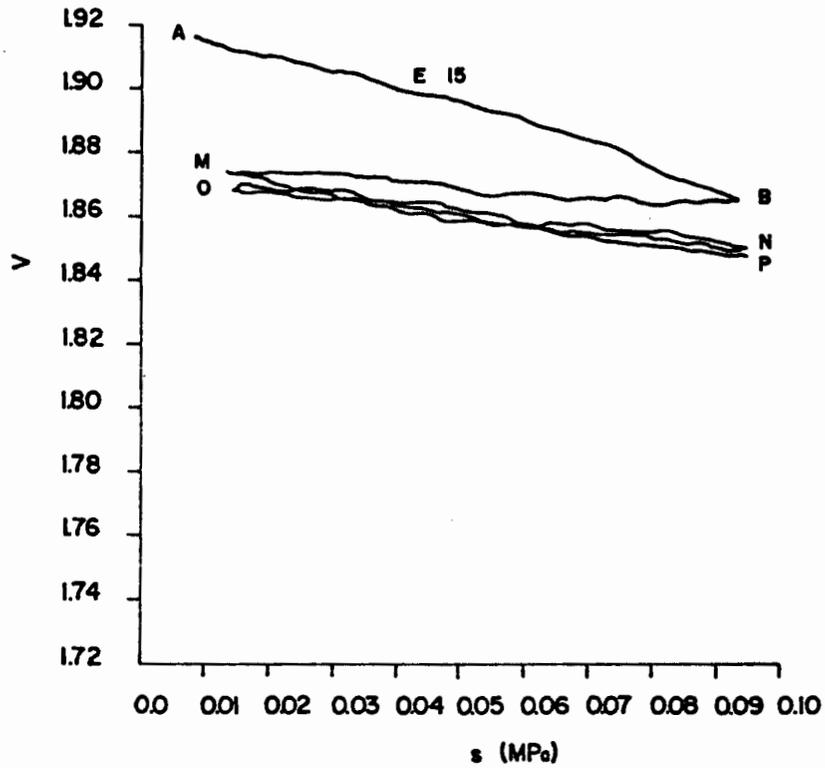


Figura 96b. Volumen específico.

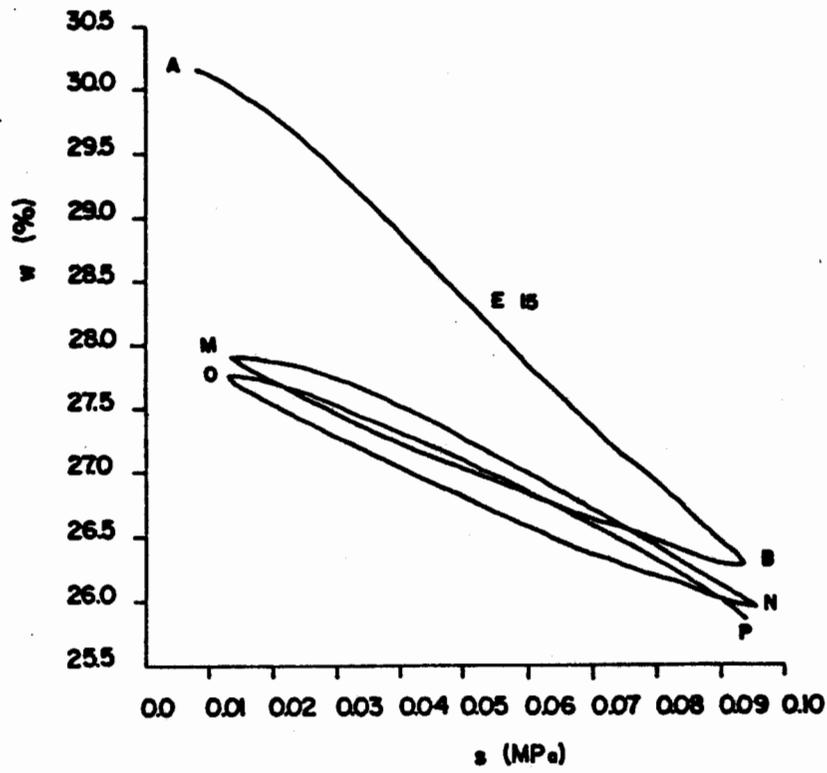


Figura 96c. Humedad.

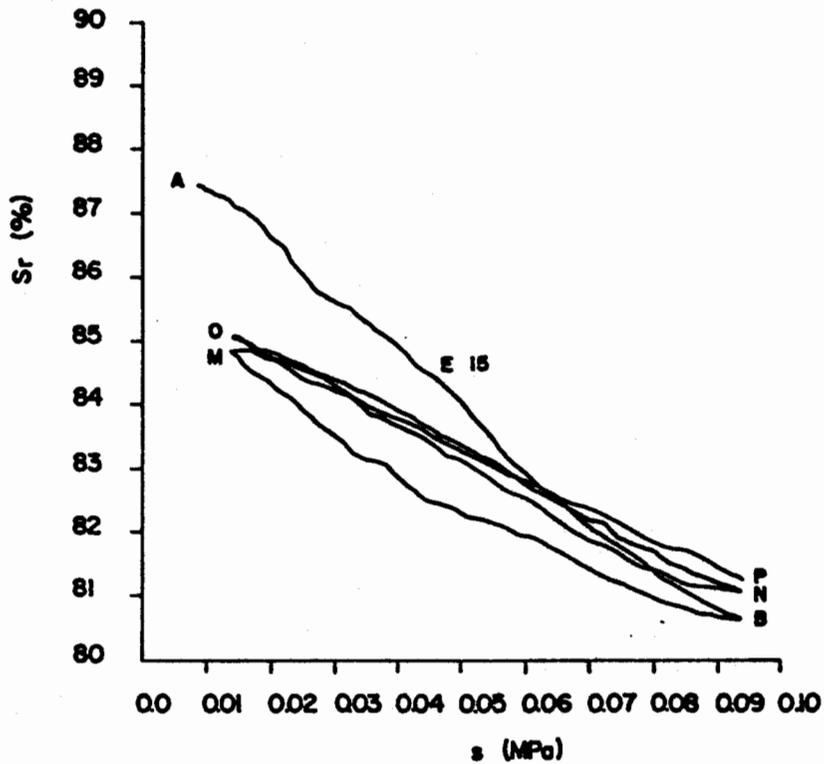


Figura 96d. Grado de saturación.

Figuras 96. Compresibilidad del suelo en ciclos de incremento y disminución de la succión a tensión esférica constante.

Análogamente a lo realizado en el caso anterior se ha estudiado la posible expresión matemática que relacione el volumen específico de la muestra y la succión aplicada, a tensión esférica constante. Para ello se ha representado gráficamente el parámetro λ_s anteriormente definido para comprobar si una ley logarítmica puede ser adecuada, y para estudiar, asimismo, los posibles estados de sobreconsolidación del suelo ante incrementos de la succión.

Se han supuesto inicialmente de nuevo unas expresiones del tipo $v=N_s - \lambda_s \cdot \ln(s+z)$, con z arbitrario, por razones análogas a las indicadas en el apartado anterior. En este caso, además, si z es mayor que 0 se evita el problema derivado de dicha ley cuando la succión es nula. Las figuras 97 presentan un caso correspondiente a una serie de trayectorias entre $s=0,01$ MPa y $s=0,09$ MPa con $p-p_s=0,045$ MPa constante habiéndose hecho valer z , sucesivamente, 0 MPa, 0,05 MPa, 0,1 MPa, 0,2 MPa y 0,3 MPa. En la figura 97b se muestran los resultados obtenidos. Aunque en este caso estos resultados no son tan claros como en el anterior, se observa también que la pendiente media de λ_s para valores de succión suficientemente altos pasa de ser negativa con $z=0$ MPa a positiva con $z=0,3$ MPa. Tomando $z=0,1$ MPa como valor más correcto, se observa en su curva correspondiente que λ_s se mantiene relativamente constante, por lo que es en consecuencia adecuado utilizar en este caso una ley logarítmica en procesos de incremento de la succión.

Por lo que respecta a la influencia de la tensión esférica, las figuras 98 muestran la variación de λ_s en dos trayectorias de incremento de la succión realizadas a tensiones esféricas diferentes. La primera tiene su origen en el estado inicial de la muestra ($p-p_s=0,045$ MPa) y la segunda se realiza tras incrementar $p-p_s$ hasta 0,35 MPa. Como se observa, el valor final de λ_s es prácticamente

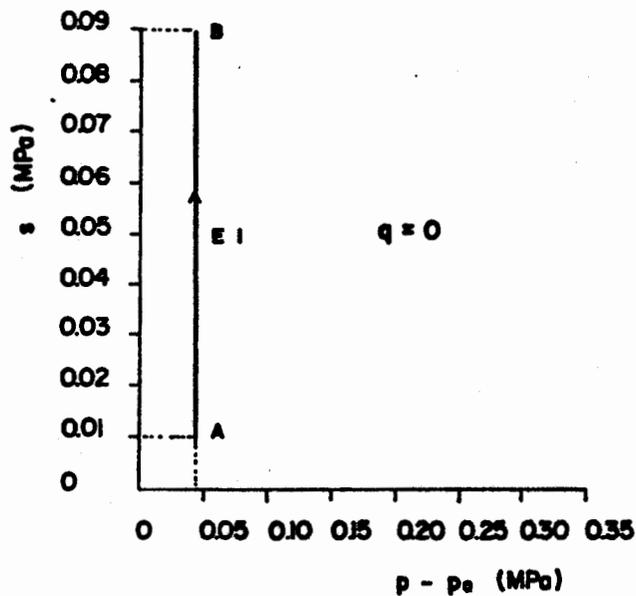


Figura 97a. Trayectoria tensional.

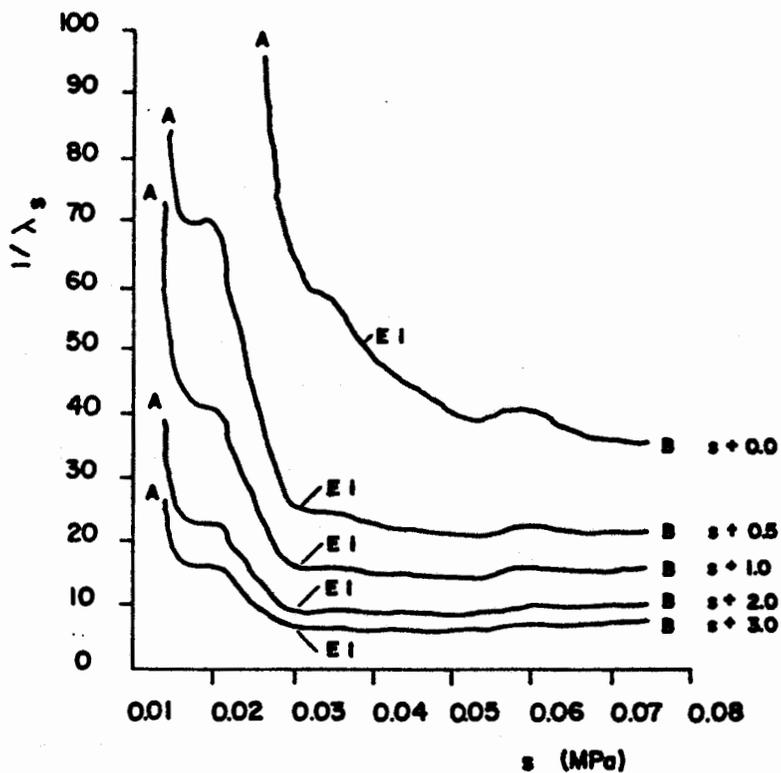


Figura 97b. Resultados.

Figuras 97. Representación del parámetro λ_s para varios valores de z en una trayectoria de incremento de la succión a tensión esférica constante.

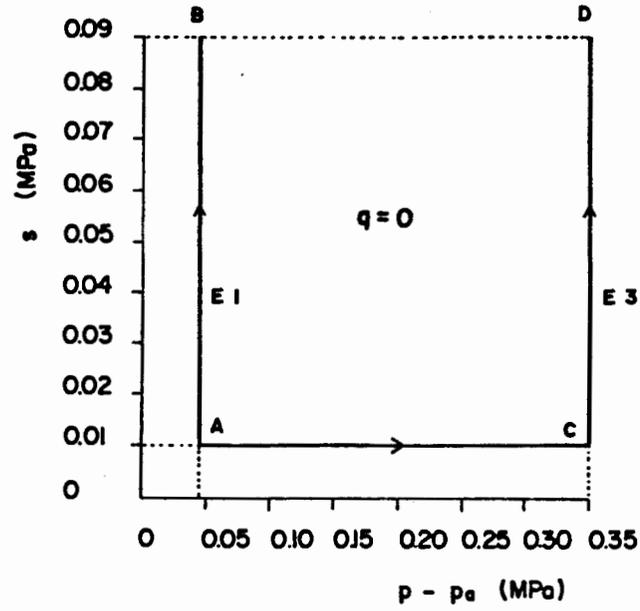


Figura 98a. Trayectorias tensionales.

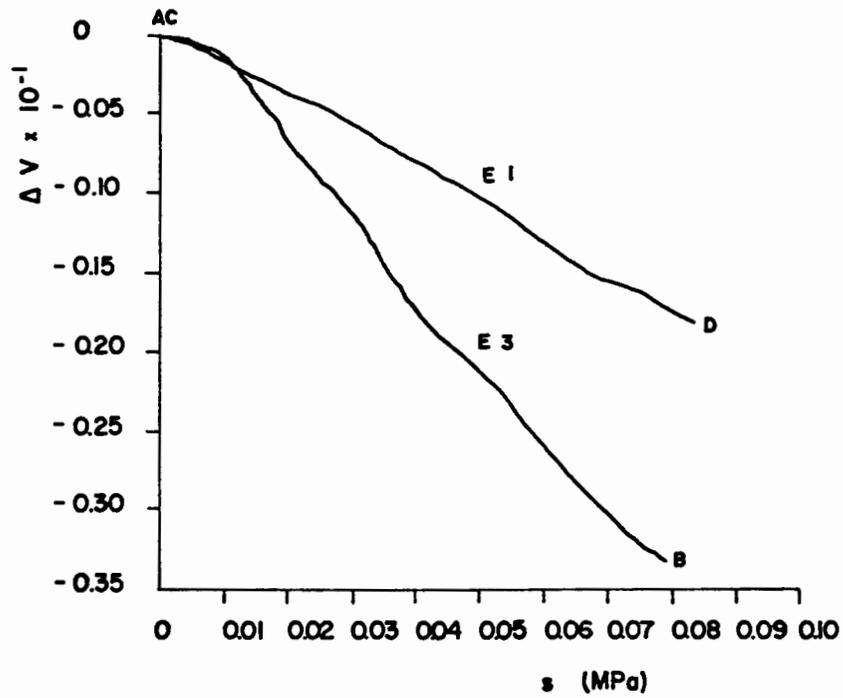


Figura 98b. Volumen específico.

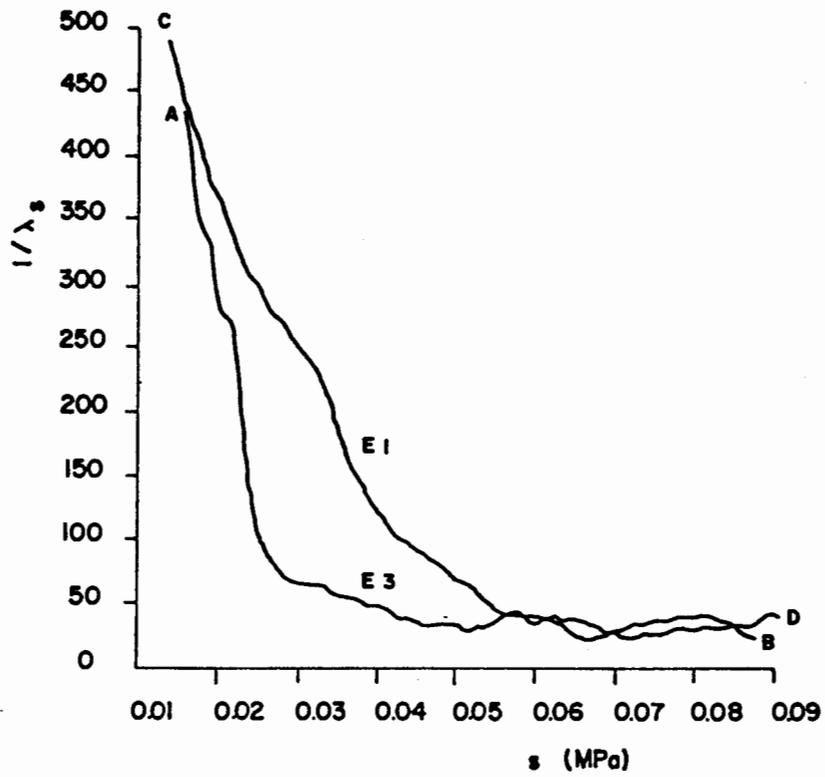


Figura 98c. Parámetro λ_s .

Figuras 98. Compresibilidad del suelo ante incrementos de la succión para varias tensiones esféricas.

constante en ambos casos, sin embargo la muestra ensayada a mayor tensión esférica presenta un cierto grado de sobreconsolidación ante cambios de la succión, mayor que la que ha sido ensayada a menor tensión esférica por cuanto λ_s se estabiliza para succiones más altas, presentando previamente valores mayores (comportamiento más rígido). En consecuencia se puede decir que λ_s es poco o nada dependiente, al menos en los intervalos tensionales utilizados, de la tensión esférica aplicada, aunque ésta última al aumentar puede producir una cierta sobreconsolidación del suelo ante cambios de la succión. De acuerdo con la figura 98c la succión de preconsolidación correspondiente a la trayectoria AB es del orden de 0,02 MPa y la correspondiente a la trayectoria CD del orden de 0,04 MPa, siendo λ_s aproximadamente 0,05.

De acuerdo con todo ello se puede suponer que el parámetro z anteriormente estudiado es una constante, ya que, tal y como se ha expuesto, la rigidez del suelo ante cambios de la succión puede considerarse independiente de la tensión esférica aplicada y cuando se comprobó la corrección de la ley logarítmica para relacionar v y s el parámetro z permaneció invariable. En estas condiciones este parámetro no puede depender ni de $(p-p_s)$ ni de s . Con el fin de dar a z un sentido físico, y teniendo en cuenta que vale en este caso 0,1 MPa, se ha supuesto, de forma totalmente arbitraria, que z coincide con la presión atmosférica (p_{atm}). En consecuencia se ha considerado como ley de comportamiento en las ramas de carga novalas:

$$v = N_s - \lambda_s \cdot \ln(s + p_{atm})$$

Se ha considerado análogamente para las ramas de descarga y carga recuperables el mismo tipo de ley:

$$v = v_{k_s} - k_s \cdot \ln(s + p_{atm})$$

En cuanto al comportamiento de las muestras en trayectorias tensionales con disminución de la succión tras incrementar la tensión esférica, las figuras 99 muestran tres casos significativos. Las tensiones esféricas en las que se ha reducido la succión son $p - p_s = 0,3$ MPa, $p - p_s = 0,45$ MPa y $p - p_s = 0,7$ MPa. Como se observa en la figura 99b en el primer caso la muestra hincha y en el segundo y tercero, primero hinchan y después colapsan, es decir, el comportamiento deformacional producido depende de la tensión esférica aplicada, de forma que el colapso aumenta con ella al menos en el intervalo de tensiones utilizado. Los valores de λ_s en estas trayectorias son poco significativos por cuanto en este caso se combinan los hinchamientos recuperables al reducir la succión y el colapso estructural provocado por la tensión esférica, por lo que λ_s tal como se ha definido no se ajusta al comportamiento real.

Las figuras 100 presentan, finalmente, la respuesta del suelo cuando, tras reducir la succión y haber colapsado la muestra, se somete a ésta a ciclos sucesivos de carga y descarga de succión. Como se observa, a partir de dicho estado el comportamiento es elástico, confirmando que el colapso se produce una sola vez, en la primera disminución de succión.

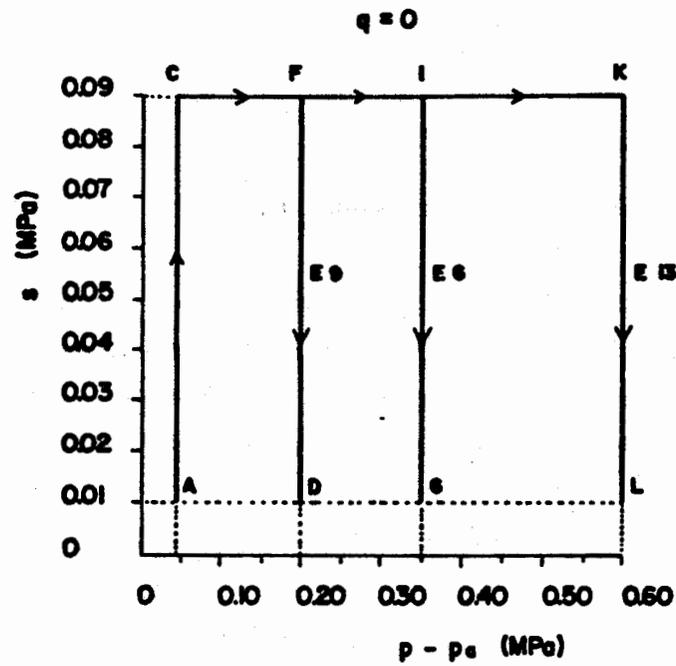


Figura 99a. Trayectorias tensionales.

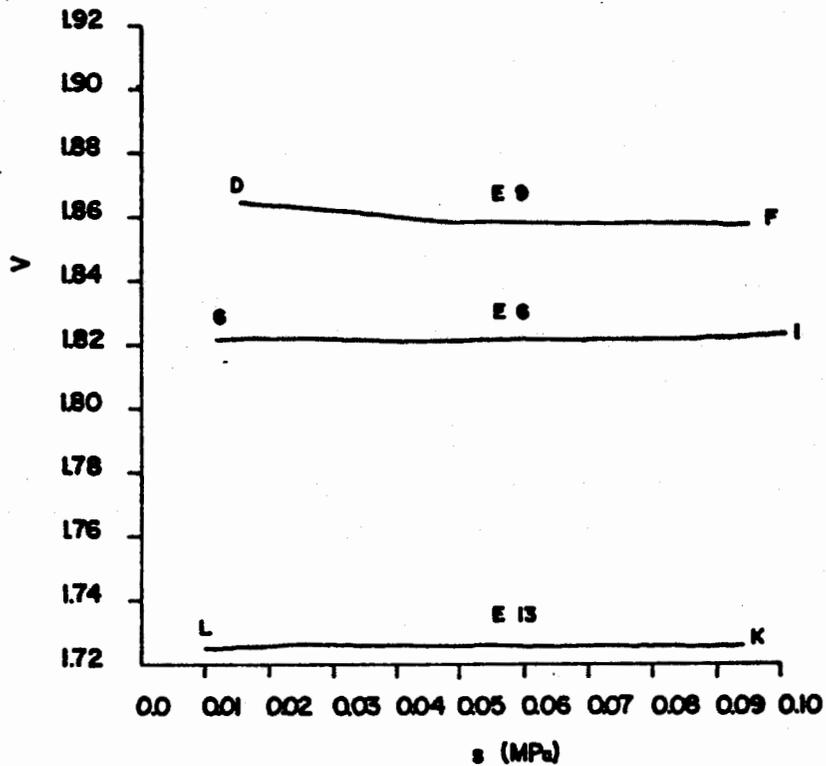


Figura 99b. Volumen específico.

Figuras 99. Comportamiento del suelo ante disminuciones de la succión para varias tensiones esféricas.

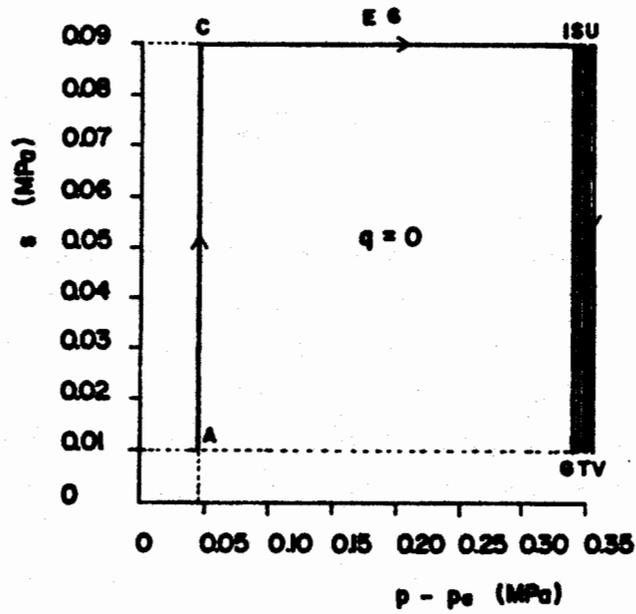


Figura 100a. Trayectoria tensional.

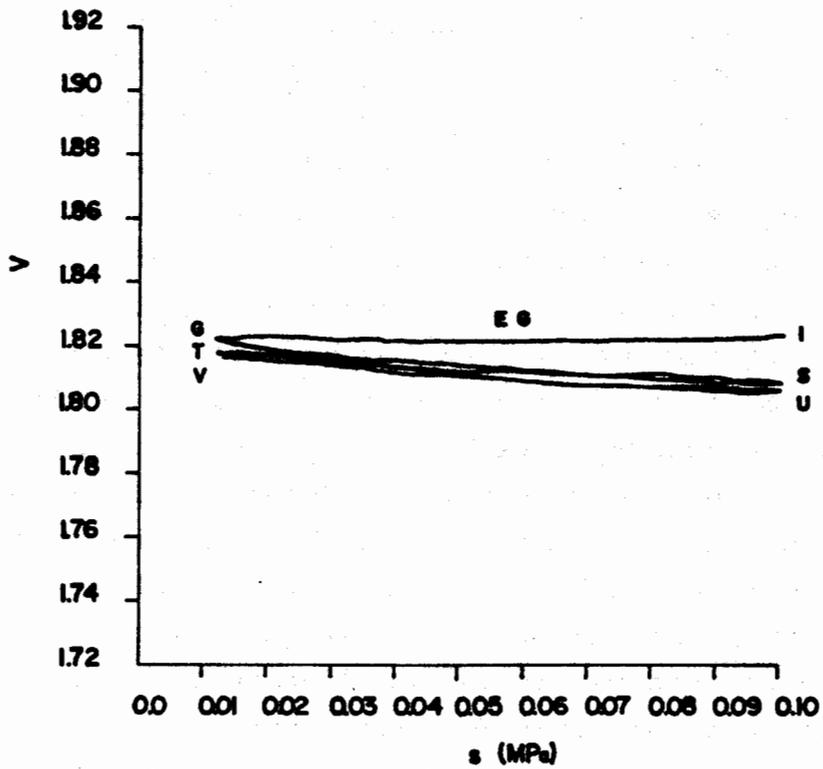


Figura 100b. Volumen específico.

Figuras 100. Comportamiento del suelo en ciclos de incremento y disminución de la succión tras un fenómeno de colapso.

4.5.2.4. Comportamiento del suelo ante aumentos de la tensión de corte

Varios de los ensayos realizados han incluido trayectorias con aumento de la tensión de corte sin variar la succión, ya sea con la tensión esférica constante o en aumento ($d\sigma_3=0$, $d(p-p_u)=dq/3$). Las figuras 101 muestran tres casos en los que se ha representado la evolución de la tensión y de la deformación de corte hasta llegar a rotura.

Como se ha indicado en los apartados anteriores, el comportamiento del suelo no saturado en $q=0$ y $ds=0$ puede ser considerado de forma análoga, cualitativamente, al caso de los suelos saturados. Para ello se debe partir de las curvas novalas de carga y las de descarga y recarga elástica, expresables ambas mediante leyes logarítmicas. Con el fin de estudiar el comportamiento de suelos no saturados ante incrementos de la tensión de corte es conveniente en este punto exponer sucintamente algunos conceptos habitualmente utilizados en suelos saturados y que pueden ser de utilidad en este caso. Como es sabido en algunos suelos saturados es posible definir una superficie en el espacio (p',q,v) (superficie de estado límite) que es el lugar geométrico de los estados posibles del suelo cuando no está sobreconsolidado (figura 102a). Cuando existen descargas tensionales y se sobreconsolida el suelo, su estado se sitúa por debajo de dicha superficie siendo entonces q menor que el obtenido en ella para los p' y v correspondientes. Intersectando esta superficie por planos $dv=0$ se obtienen curvas todas ellas de la misma forma pero con diferente tamaño (homotéticas dos a dos). Definida una determinada trayectoria (p',q,v) en dicha superficie, se puede obtener la forma de las curvas en $dv=0$ dividiendo p' y q por un p'_u que es la tensión esférica correspondiente al v de cada punto en la curva de consolidación noval del suelo, y representando la trayectoria p'/p'_u y q/p'_u (figura 102b). En ensayos no drenados se cumple que $dv=0$ y la curva $p'-q$ obtenida es

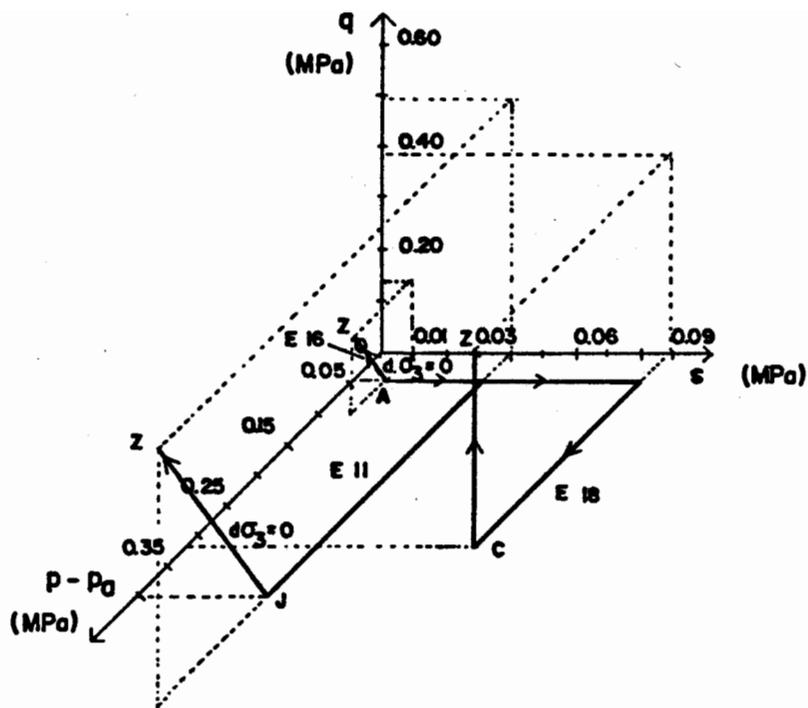


Figura 101a. Trayectorias tensionales.

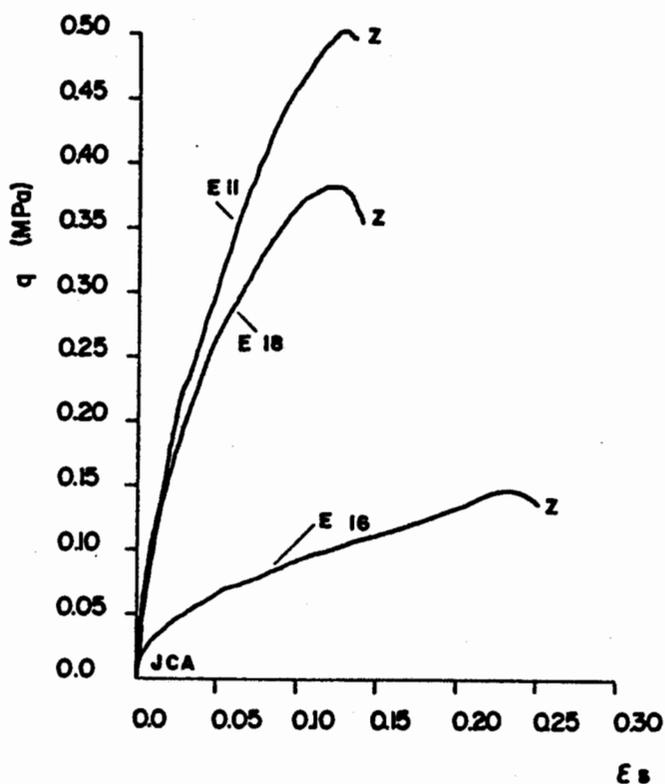


Figura 101b. Deformación de corte.

Figuras 101. Comportamiento del suelo ante incrementos de la tensión de corte.

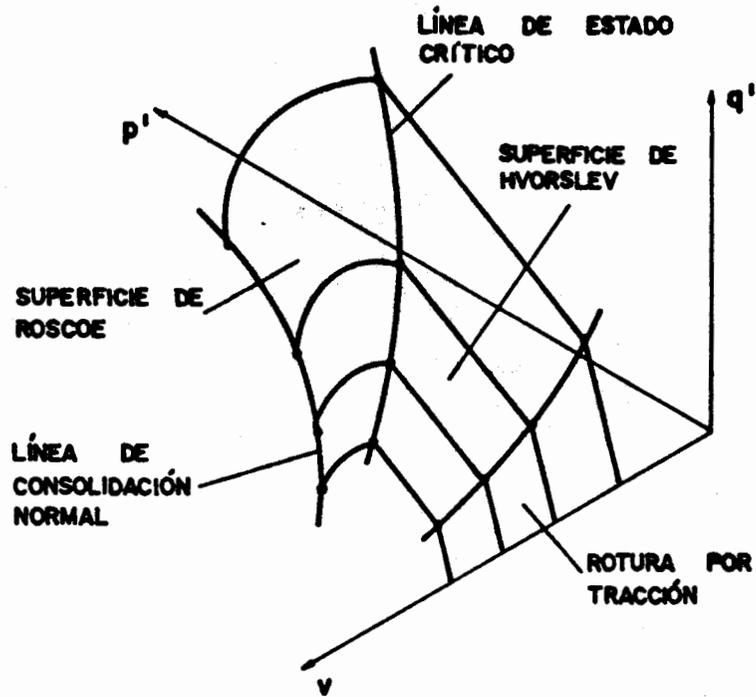


Figura 102a. Superficie de estado límite.

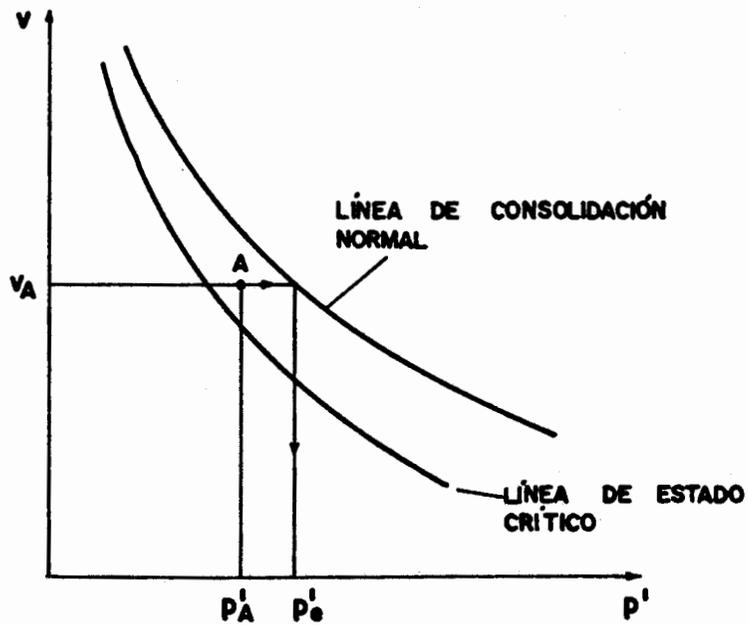


Figura 102b. Definición de p'_e .

Figuras 102. Superficie de estado límite y definición de p'_e .

directamente una de estas secciones de la superficie de estado límite. La analogía en el comportamiento de suelos saturados y no saturados en $ds=0$, induce a suponer la existencia de esta superficie en dicho caso.

Con el fin de observar la forma de esta superficie, se ha representado gráficamente $(p-p_*)/p_*$ y q/p_* en trayectorias a tensión de corte creciente. p_* quedará definido a partir de las curvas noales en $q=0$ de los ensayos realizados:

$$v = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln(p_*)$$

$$p_* = \frac{\exp(N(s) - v)}{\lambda(s)}$$

Es más conveniente dibujar $((p-p_*)/p_*, q/p_*)$ en ensayos con $dq > 0$ y $d(p-p_*) = 0$ que en ensayos con $dq > 0$ y $d\sigma_3 = 0$ ($d(p-p_*) = dq/3$) por cuanto en este último caso la trayectoria $(p-p_*, q)$ se aleja más de la $((p-p_*)/p_* - q/p_*)$ con lo que al ser la corrección a realizar mayor, los errores también lo son y la fiabilidad de la curva obtenida menor. Por esta razón se han representado tan sólo casos correspondientes a los primeros ensayos citados.

Las figuras 103 muestran estas curvas $((p-p_*)/p_*, q/p_*)$ en tres casos en los que el aumento de la tensión de corte se realizó con $d(p-p_*) = 0$. No se han podido realizar ensayos de este tipo con los menores de los $p-p_*$ aplicados ($(p-p_*) = cte = 0,045$ MPa) por cuanto al incrementar la tensión de corte aumenta la tensión esférica ($d(p-p_*) = dq/3$) y para mantener $p-p_* = cte$ se debe reducir σ_3 con lo que esta última tensión se acercaría a p_* ($p_* = 0,1$ MPa y σ_3 inicial $0,145$ MPa), lo cual no es conveniente (se debe cumplir con suficiente margen que $\sigma_3 > p_*$). Los tres casos presentados corresponden respectivamente a $p-p_* = 0,35$ MPa y $s = 0,09$ MPa, $p-p_* = 0,137$ MPa y $s = 0,09$ MPa y $p-p_* = 0,35$ MPa y $s = 0,0$ MPa.

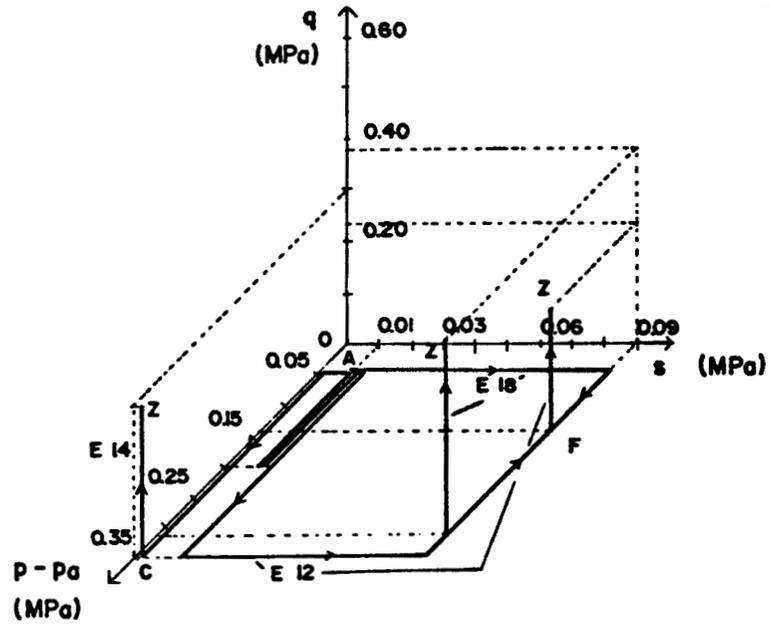


Figura 103a. Trayectorias tensionales.

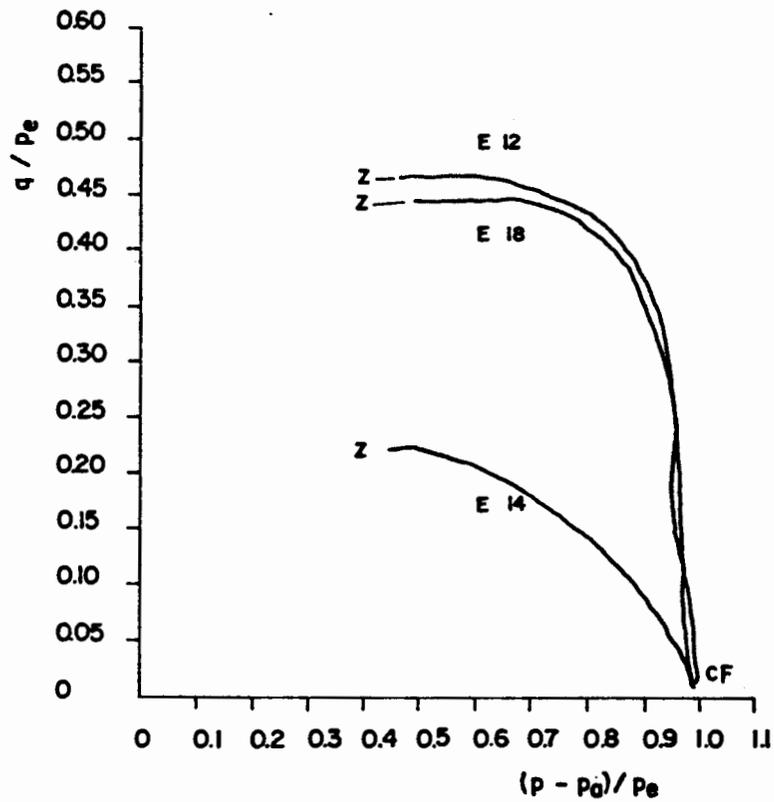


Figura 103b. Resultados.

Figuras 103. Curvas $((p-p_0)/p_0, q/p_0)$.

Para definir p_c se ha seguido el procedimiento que se indica a continuación. De acuerdo con los resultados expuestos en apartados anteriores se ha supuesto $\lambda(0,9)=0,06$ y $\lambda(0)=0,14$. En el primer y tercer caso se ha considerado, de acuerdo con la trayectoria tensional seguida, que las muestras partían de su estado normalmente consolidado en $q=0$, lo cual ha permitido calcular $N(s)$ en ellos aplicando $v=N(s)-\lambda(s)\ln(p-p_c)$, conocido v al inicio del proceso de corte. En el segundo caso la descarga de la tensión esférica previa a dicho proceso ha impedido que se pudiese hacer así. Por ello se ha calculado $N(s)$ a partir del v correspondiente al comienzo de la descarga, suponiendo en primera aproximación que la muestra estaba en dicho punto cercana a su estado normalmente consolidado. La menor variación de v en ramas de descarga hace que este error pueda considerarse muy pequeño. De esta forma se tiene en cada punto del proceso de corte $p_c = \exp((N(s)-v)/\lambda(s))$ con v obtenido en estos puntos durante el ensayo.

El aspecto de las curvas mostradas en la figura 103b es análogo al descrito anteriormente para el caso saturado. Como se observa en esta figura la segunda muestra presenta un grado de sobreconsolidación bajo (parte prácticamente de $(p-p_c)/p_c=1$ en $q/p_c=0$ tal como previamente se había supuesto). Tanto esta segunda muestra como la primera siguen trayectorias $((p-p_c)/p_c, q/p_c)$ análogas, lo cual confirma que para $ds=0$ el comportamiento del suelo, específicamente en este caso en procesos de corte, puede ser descrito de forma similar al caso de suelos saturados mediante el tipo de modelo supuesto en este apartado. La tercera muestra, sin embargo, aunque presenta una curva $((p-p_c)/p_c, q/p_c)$ similar a las anteriores, queda por debajo de ellas. Este comportamiento es coherente con el efecto de la succión, por cuanto al ser ésta menor en este caso respecto a los otros dos ensayos ($s=0$ MPa < 0,09 MPa) disminuye la resistencia al corte, tal y como se describe

en el siguiente apartado.

Debido a esta última consideración se realizó un ensayo adicional intentando obtener la rotura de la muestra en un proceso $d(p-p_u)=0$, $dq=0$ y $ds<0$, es decir, reduciendo la succión. Para ello se llevó al suelo a un estado tensional con succión alta ($s=0,09$ MPa), se incrementó la tensión de corte procurando no llegar a rotura, y se redujo posteriormente la succión. Tras tres intentos en los que la muestra no rompió (q demasiado bajo y/o $p-p_u$ demasiado alto) o rompió antes del último proceso (q demasiado alto y/o $p-p_u$ demasiado bajo) se consiguió un ensayo de este tipo con los q y $p-p_u$ adecuados. Las figuras 104 muestran la trayectoria seguida y el resultado obtenido en términos de s , $\Delta\epsilon_v$ y $\Delta\epsilon_u$. Como se observa, la muestra llega a $p-p_u=0,225$ MPa y $q=0,32$ MPa, y al reducirse a continuación la succión se produce la rotura.

Los valores de $p-p_u$ y de q correspondientes a los tres ensayos previos en los que no se obtuvo la rotura en el proceso de disminución de la succión fueron los siguientes:

$p-p_u=0,325$ MPa y $q=0,25$ MPa. No se llegó a rotura

$p-p_u=0,325$ MPa y $q=0,28$ MPa. No se llegó a rotura

$p-p_u=0,25$ MPa y $q=0,32$ MPa. Se llegó a rotura antes del
proceso de disminución de la
succión

4.5.2.5. Resistencia al corte

La tabla 20 muestra los estados de rotura obtenidos en varios de los ensayos realizados al incrementar la tensión de corte a succión constante, incluyendo tanto procesos $d\sigma_3=0$ como procesos $d(p-p_u)=0$. La tensión de corte indicada en dicha tabla es la máxima alcanzada durante el ensayo. Como se observa, tanto los incrementos de la tensión esférica como los incrementos de la succión

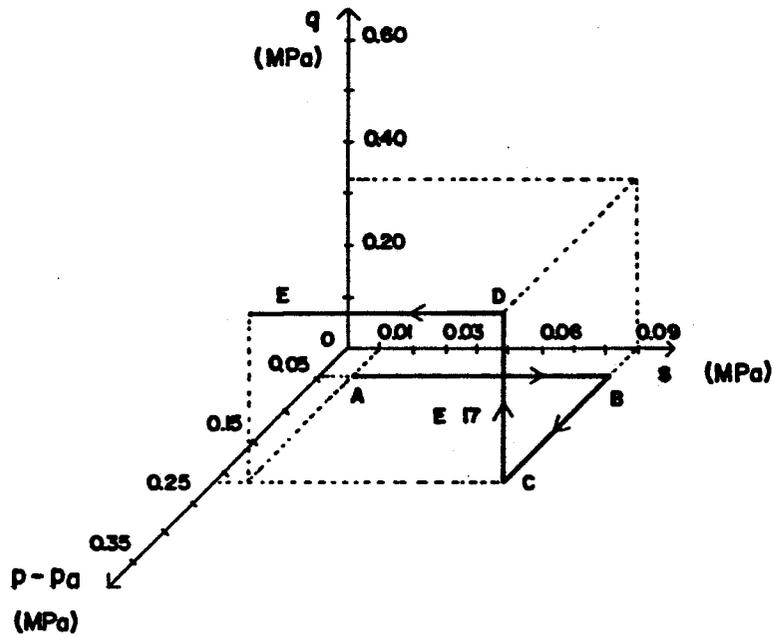


Figura 104a. Trayectoria tensional.

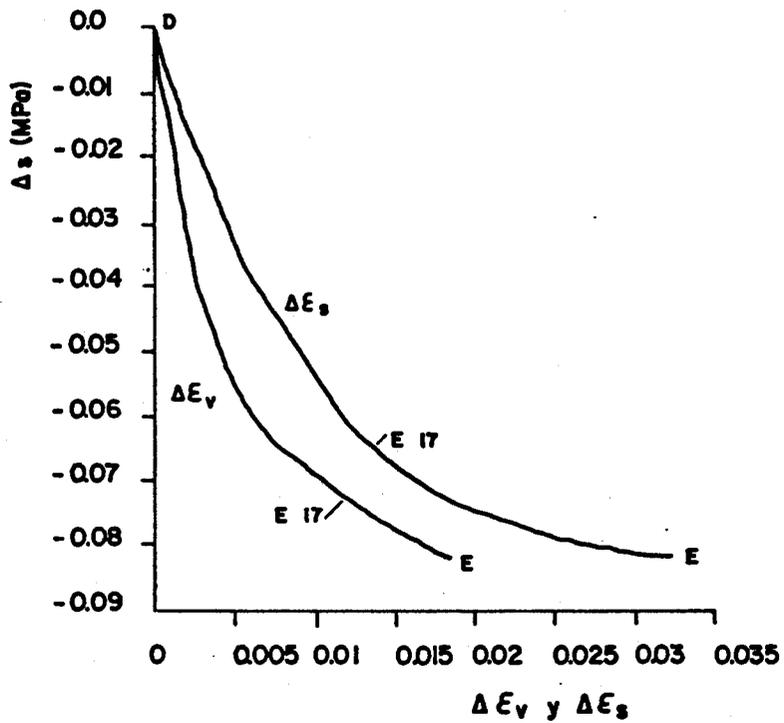


Figura 104b. Deformación volumétrica y deformación de corte.

Figuras 104. Ensayo hasta rotura en un proceso de disminución de la succión.

Ensayo	p-p _a (MPa)	s (MPa)	q (MPa)
E3	0,59	0,097	0,566
E4	0,54	0,095	0,567
E6	0,475	0,010	0,364
E8	0,39	0,095	0,37
E9	0,28	0,016	0,242
E10	0,557	0,041	0,497
E11	0,544	0,040	0,495
E12	0,137	0,095	0,227
E14	0,34	0,0	0,291
E15	0,185	0,0142	0,149
E16	0,142	0,0097	0,134
E18	0,325	0,091	0,38
E19	0,558	0,016	0,507

Tabla 20. Estados de rotura.

producen un aumento de la resistencia al corte del suelo en los intervalos de presión aplicados.

Con el fin de estudiar estos valores de la tensión de corte en rotura, se ha considerado, como referencia, la existencia en el caso de suelos saturados de una línea de estado crítico ($q=M.p'$ con M constante) que es el lugar geométrico de sus estados de rotura. Estos estados se producen cuando la muestra se ve sometida a deformaciones de corte sin producirse ya deformación volumétrica. Como se expuso en el capítulo 2 de esta tesis, diversos autores comprueban experimentalmente que la tensión de corte en los estados de rotura a tensión esférica constante no depende linealmente de la succión sino que va progresivamente reduciendo su crecimiento desde el estado saturado hasta anularse en un máximo y disminuir posteriormente. Pese a ello se ha supuesto, en primera aproximación y dado que los rangos de succión utilizados en los ensayos de esta tesis no han sido muy amplios, que se puede definir en el caso de suelos no saturados un plano de estado crítico ($q=a.(p-p_u)+b.s$, con a y b constantes) que es el lugar geométrico de dichos estados de rotura en estos suelos.

Para comprobar esta hipótesis se han obtenido a y b en el caso del caolín a partir de los resultados de la tabla 20 aplicando para ello el método de los mínimos cuadrados. Los valores de a y b obtenidos por este procedimiento han sido, respectivamente, 0,8212 y 1,0224. La figura 105 muestra comparativamente q obtenido en los ensayos y q predicho aplicando esta hipótesis. Los errores en la predicción han sido como máximo del orden del 10 %, con una desviación típica del 6,83 %. Se concluye en consecuencia que en este caso y para los intervalos de tensiones aplicados es correcto suponer la existencia de este plano de estado crítico.

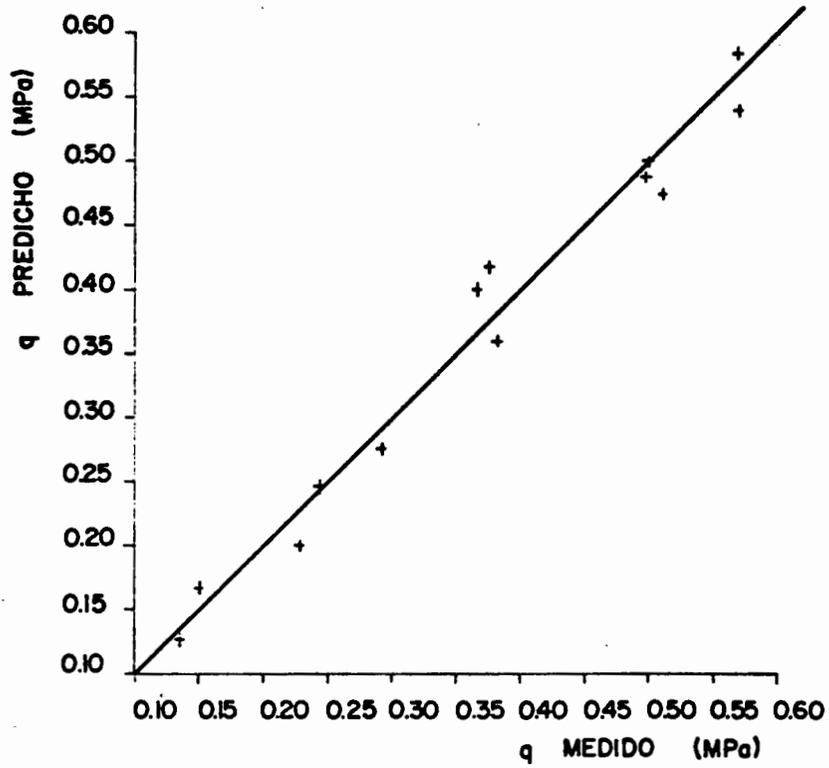
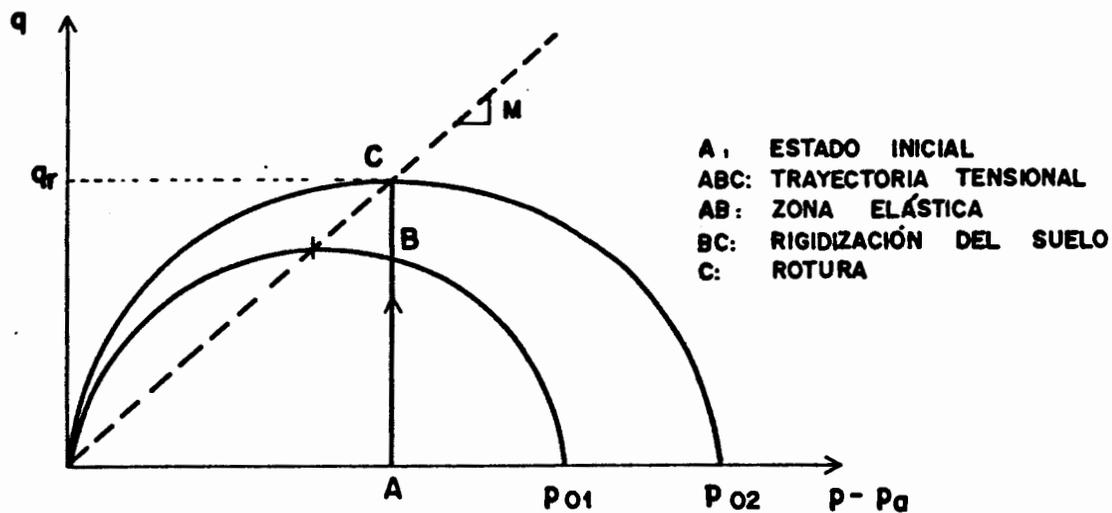
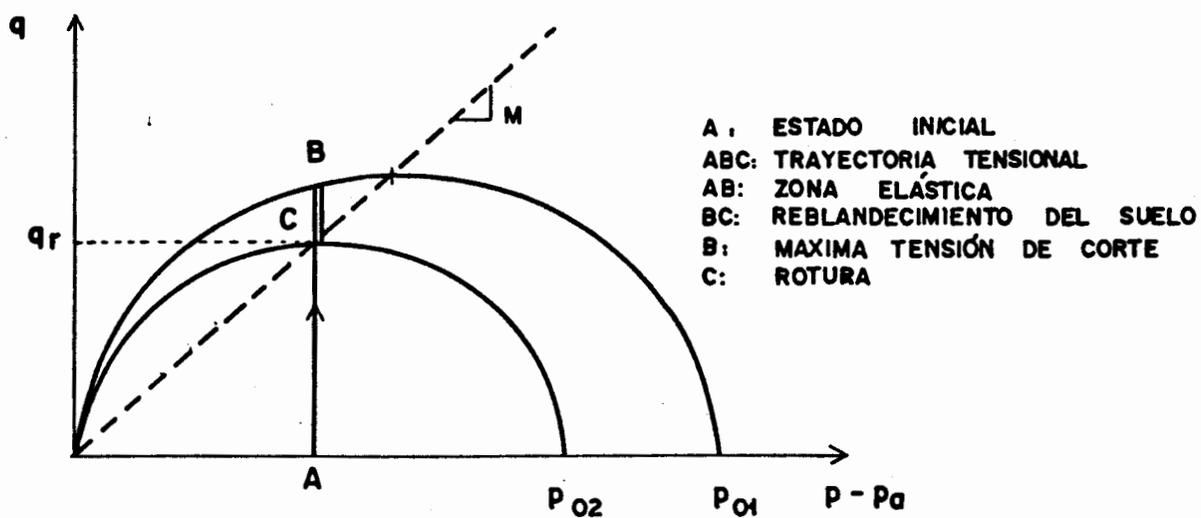


Figura 105. Comparación entre q calculado bajo la hipótesis de existencia de un plano de estado crítico y q obtenido en los ensayos.

Como se observa, en las anteriores consideraciones no se han diferenciado los ensayos que, por sus trayectorias tensionales, puedan haber sido llevados a rotura desde estados sobreconsolidados de las muestras. Como es sabido, y en paralelismo con el caso de suelos saturados, si estas muestras están normalmente consolidadas o ligeramente consolidadas, se llega a su estado crítico en incrementos monótonos de la tensión de corte (por ejemplo con $ds=0$ y $d\sigma_3=0$ o $d(p-p_u)=0$) a través de la superficie de Roscoe $((p-p_u)$ justo antes de rotura mayor que el correspondiente al estado crítico para cada succión). En este caso se puede llegar a dicho estado en ensayos a tensión controlada en los que la tensión de corte máxima es la de rotura, tal y como se realiza, en particular, en el triaxial hidráulico utilizado en esta tesis. En muestras muy sobreconsolidadas, sin embargo, se puede llegar en estos casos a la superficie de Hvorslev y no a la de Roscoe $((p-p_u)$ justo antes de rotura menor que el correspondiente al estado crítico para cada succión), presentando la muestra un pico de tensión de corte y no llegándose a rotura hasta alcanzarse mayores deformaciones de corte que se corresponden con tensiones de corte menores que la máxima. Este estado de rotura real tan sólo puede alcanzarse en laboratorio si al menos ese tramo final en que la tensión de corte se reduce se realiza a deformación controlada. En ensayos a tensión controlada se obtiene una rotura aparente para el valor de pico, aunque en la muestra todavía se producen deformaciones volumétricas no habiéndose llegado todavía, en consecuencia, a rotura. En este caso, por lo tanto, la tensión de corte obtenida es mayor que la correspondiente al estado crítico. Las figuras 106 muestran gráficamente estas consideraciones.



ROTURA A TRAVÉS DE LA SUPERFICIE DE ROSCOE



ROTURA A TRAVÉS DE LA SUPERFICIE DE HVORSLEV

Figura 106. Rotura por las superficies de Roscoe y de Hvorslev.

De acuerdo con las trayectorias tensionales seguidas en los ensayos realizados y con los comportamientos descritos en apartados anteriores, los grados de sobreconsolidación correspondientes a las distintas muestras no han sido altos y por lo tanto la rotura se ha alcanzado en todos los casos a través de la superficie de Roscoe. La buena aproximación obtenida al definir el plano de estado crítico así como la inexistencia de una tendencia a dar tensiones de corte más altas en las muestras que pudieran haber sido sobreconsolidadas, confirman esta hipótesis.

4.5.2.6. Fenómenos de histéresis s-w y s-S_r

En esta tesis no se han estudiado específicamente los fenómenos de histéresis de la humedad y del grado de saturación al variar la succión. Se presenta, sin embargo, en las figuras 107 los resultados de un ensayo en el que la succión fué aumentada y disminuida sucesivamente entre 0,01 MPa y 0,09 MPa, y en los que se observan estos fenómenos.

Se puede comprobar en estas figuras que las curvas s-w y s-S_r se ven afectadas por la deformabilidad de la muestra. Así, mientras a partir de la segunda rama (primera descarga) tanto las sucesivas cargas como las sucesivas descargas coinciden sensiblemente sin gran variación al no producirse en ellas más que deformaciones recuperables, tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, la primera se separa claramente de ellas al ser la rama noval en la que se producen deformaciones irreversibles. Aún cuando todas las curvas se ven afectadas por las deformaciones de la muestra, es en este caso específico en el que esta influencia queda patente.

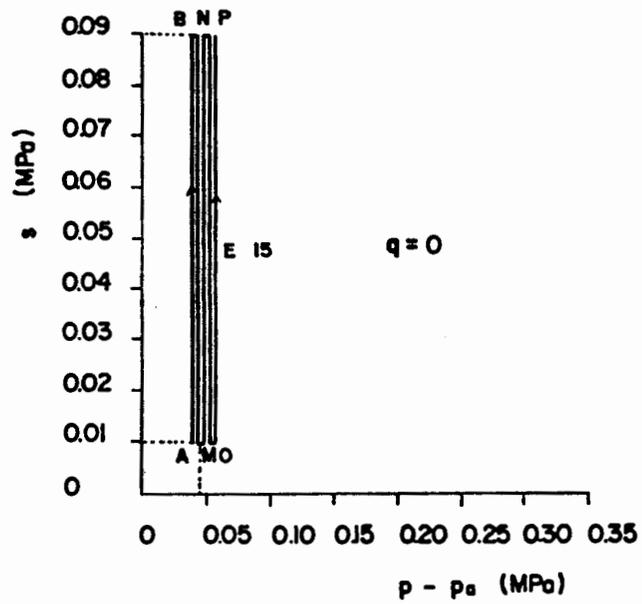


Figura 107a. Trayectoria tensional.

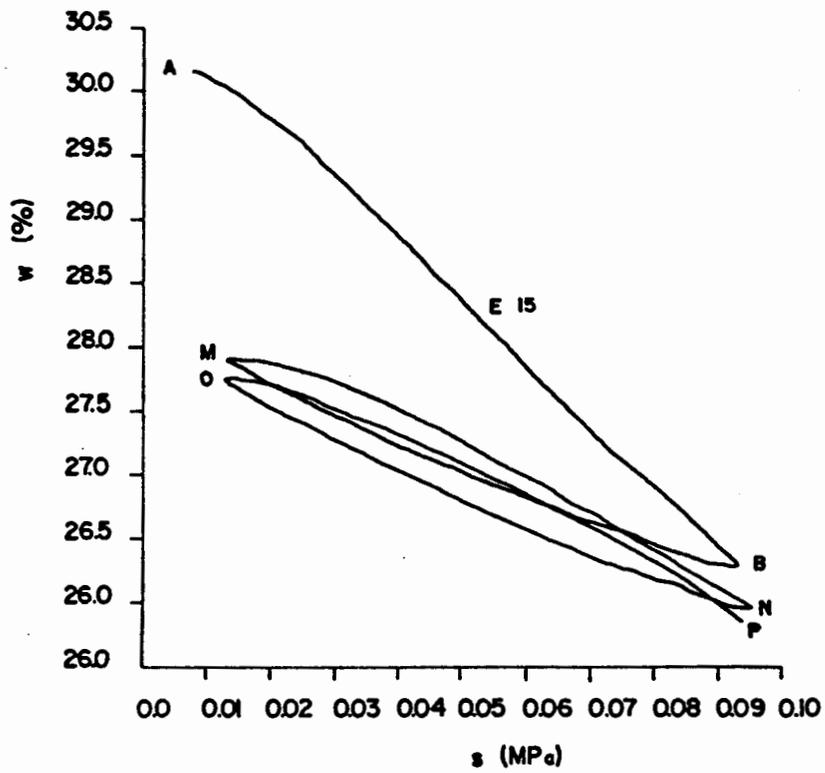


Figura 107b. Humedad.

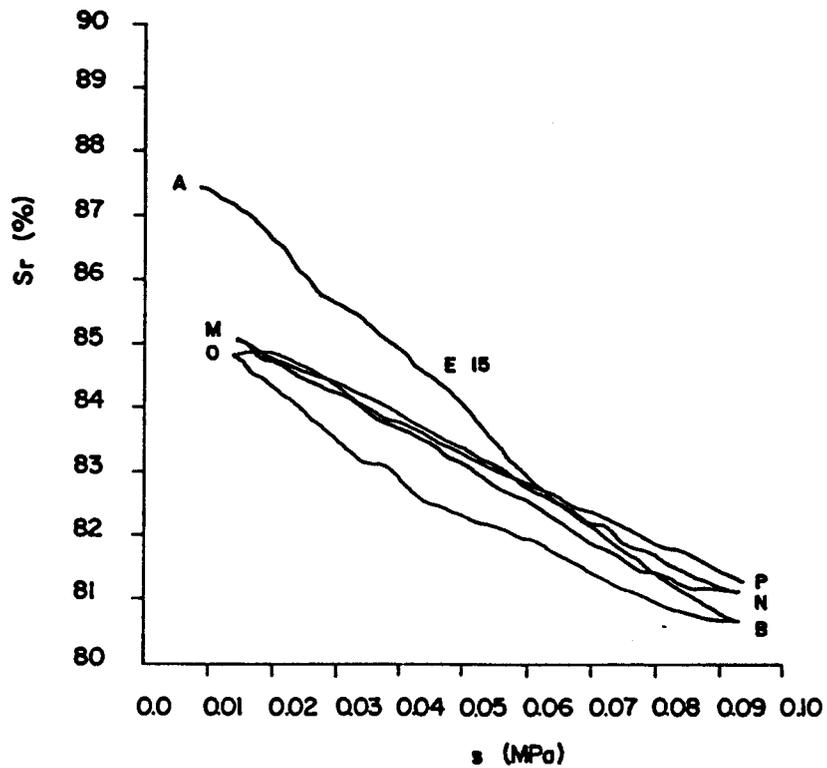


Figura 107c. Grado de saturación.

Figuras 107. Fenómenos de histéresis en las relaciones succión-humedad y succión-grado de saturación.

Los fenómenos de histéresis son evidentes en las curvas presentadas en las figuras 107, observándose con claridad la diferencia entre las sucesivas curvas de carga y las posteriores de descarga en los distintos ciclos.

4.5.2.7. Ensayo sobre caolín+arcilla

Con el ensayo realizado sobre la mezcla de caolín y arcilla se han pretendido estudiar algunos comportamientos específicos de suelos expansivos, concretamente su respuesta deformacional tanto en descensos noales de la succión como en procesos posteriores de aumento y disminución de la succión, a varios niveles de la tensión esférica.

Las figuras 108 muestran la trayectoria tensional seguida y los resultados obtenidos. Como se observa, la muestra parte de un estado inicial con $p-p_a=0,045$ MPa, $s=0,06$ MPa y $q=0$ MPa, y se ve sometida a varios ciclos de disminución y aumento de la succión, al principio entre $0,06$ MPa y $0,01$ MPa y en el último ciclo llegando hasta $s=0,09$ MPa. Posteriormente $p-p_a$ se aumenta hasta $0,35$ MPa y se realizan nuevos ciclos de variación de la succión análogos a los anteriores.

En los resultados se comprueba que el hinchamiento irre recuperable se produce fundamentalmente en el primer descenso de la succión, siendo las deformaciones posteriores en los distintos ciclos con la tensión esférica constante básicamente recuperables. El aumento de la succión hasta $0,09$ MPa en el último ciclo no afecta a este comportamiento. Asimismo se observa que posteriormente y tras incrementar la tensión esférica hasta $0,35$ MPa, las deformaciones siguen siendo en todos los casos recuperables. Estos mismos comportamientos se observan en los casos de la humedad y del grado de

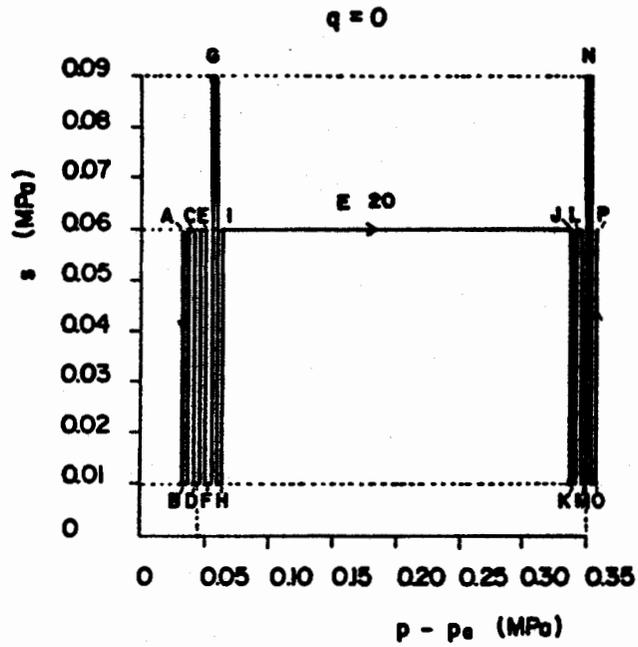


Figura 108a. Trayectoria tensional.

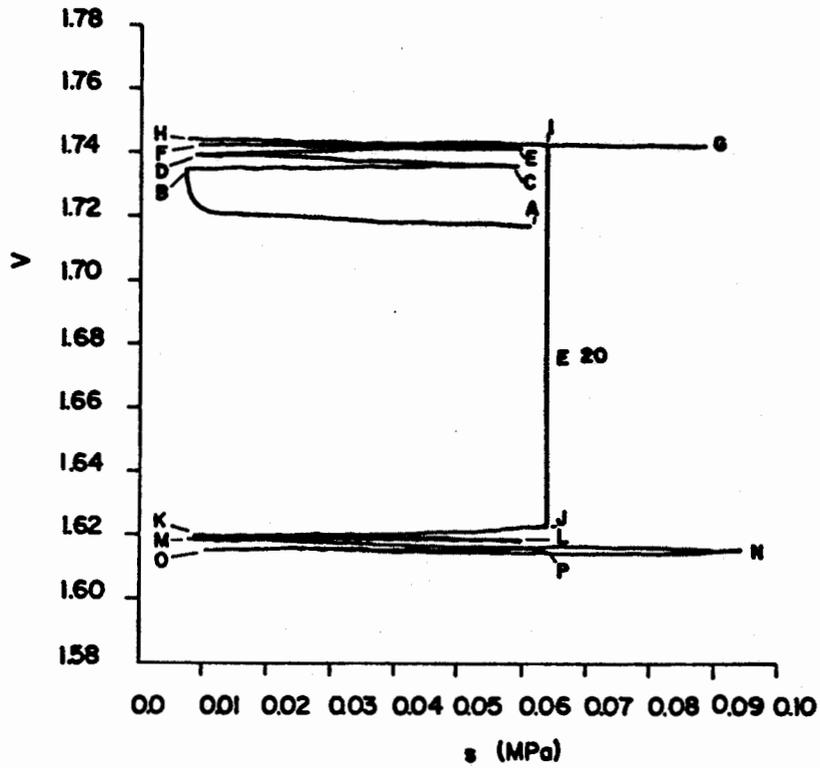


Figura 108b. Volumen específico.

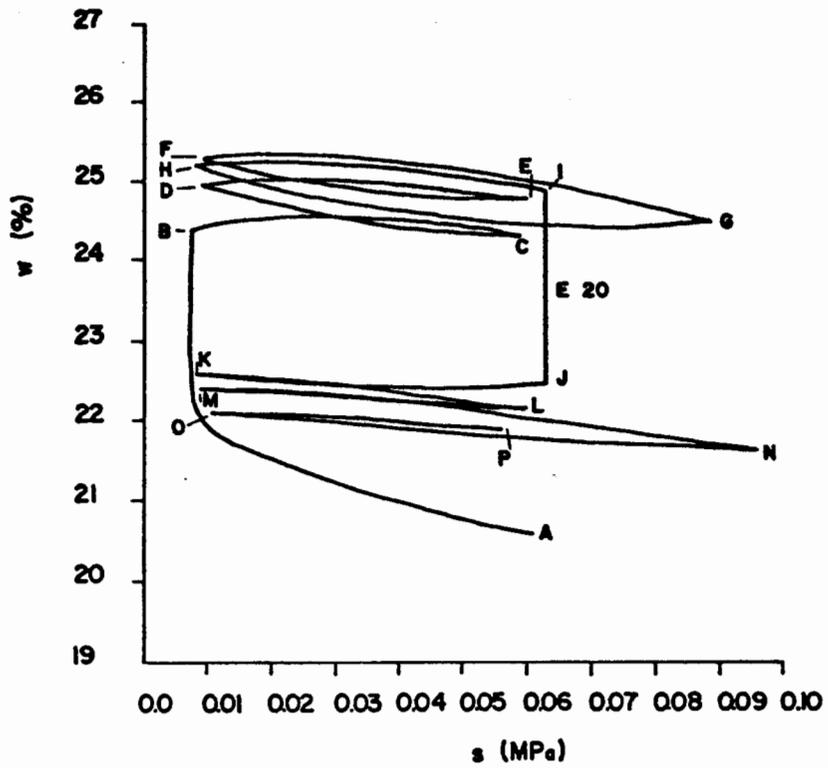


Figura 108c. Humedad.

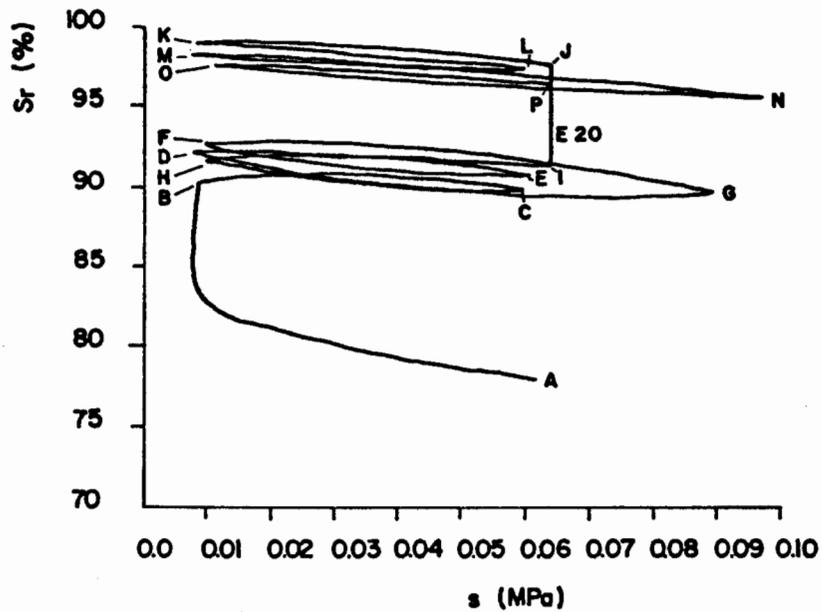


Figura 108d. Grado de saturación.

Figuras 108. Comportamiento del caolín+arcilla en ciclos de disminución e incremento de la succión para varias tensiones esféricas.

saturación, comprobándose también en estos últimos los fenómenos de histéresis descritos en el apartado anterior.

Los incrementos progresivos de deformación, humedad y grado de saturación producidos en los ciclos posteriores al primer humedecimiento, y que se observan en las figuras 108, son probablemente debidos a la disipación de presiones intersticiales acumuladas en la trayectoria tensional previamente seguida, a causa de una velocidad de variación de la succión demasiado alta, como más adelante se indica.

En consecuencia, y al menos en lo que respecta al comportamiento de la muestra al mantener la tensión esférica constante, su respuesta se puede definir a partir de la curva noval de descenso de la succión y de las curvas correspondientes a procesos de carga posteriores, de forma similar a lo realizado con la tensión esférica y con los incrementos de la succión en anteriores apartados. En este caso, sin embargo, las deformaciones irre recuperables son negativas y al disminuir la succión.

La mayor impermeabilidad de esta muestra respecto al caso del caolín, aconsejó que durante el ensayo se redujese la velocidad de variación de las tensiones e incluso que se dejase temporalmente constante el estado tensional para permitir la disipación de las presiones intersticiales generadas. Esto puede haber producido que los estados tensionales y los estados de deformación medidos no se correspondan con fiabilidad. Por esta razón no se han podido estudiar los módulos de deformación, y específicamente la posible validez de una ley logarítmica para describir el comportamiento de deformación del suelo en este caso al variar la succión.

