



ISSN 0188-7297



ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO DE SUELOS COLAPSABLES

Mauricio Barrera Bucio

**Publicación Técnica No. 226
Sanfandila, Qro, 2004**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Estudio experimental del
comportamiento hidromecánico
de suelos colapsables**

**Publicación Técnica No. 226
Sanfandila, Qro, 2003**

Este trabajo se desarrolló en el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, en el marco del proyecto *Una investigación fundamental en suelos no saturados, mineralogía, estructura y cementación* por el Dr Mauricio Barrera Bucio, investigador de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, y asesoría de los Drs Antonio Lloret y Enrique Romero, catedráticos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Se agradece a dos importantes instituciones que hicieron posible la realización del presente trabajo: el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Lista de figuras.....	xiii
<i>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</i>	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos y metodología de la investigación.....	2
1.3 Desarrollo del trabajo de investigación.....	3
<i>CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO DE SUELOS NO SATURADOS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....</i>	7
2.1 Introducción.....	7
2.1.1 Reseña histórica de la mecánica de los suelos no saturados.....	7
2.2 El suelo no saturado. Generalidades.....	8
2.2.1 Origen.....	8
2.2.2 Fases componentes de un suelo no saturado.....	9
2.2.3 Clasificación de los suelos no saturados.....	10
2.2.4 Estructura de los suelos.....	11
2.2.5 Succión en suelos no saturados.....	12
2.2.6 Comportamiento deformacional de los suelos no saturados.....	13
2.2.6.1 Fenómeno de colapso.....	13
2.2.6.2 Mecanismo de colapso.....	14
2.2.6.3 Fenómeno de expansión.....	15
2.2.6.4 Factores que afectan la expansión.....	16
2.2.6.5 Comportamiento volumétrico.....	16
2.2.7 Rigidez al corte de los suelos no saturados.....	18
2.2.8 Suelos compactados.....	20

2.3	Técnicas experimentales.....	22
2.3.1	Técnicas experimentales de aplicación y medida de la succión.....	22
2.3.2	Técnica de traslación de ejes.....	26
2.3.3	Células edométricas con control de succión.....	28
2.3.4	Célula triaxial con control de succión.....	29
2.3.4.1	Medidas de volumen en ensayos triaxiales no saturados.....	30
2.4	Estado de esfuerzos.....	31
2.4.1	Estado de esfuerzos para suelos saturados.....	31
2.4.2	Estado de esfuerzos para suelos no saturados.....	32
2.4.3	Parámetros de estado.....	34
2.4.4	Funciones y superficies de estado.....	35
2.5	Modelo elastoplástico de Barcelona.....	36
2.5.1	Generalidades de los modelos elastoplásticos.....	36
2.5.2	Modelo elastoplástico de Barcelona (BBM).....	39
 CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL.....		63
3.1	Introducción.....	63
3.2	Sistema de presión de aire y presión de agua.....	64
3.3	Psicrómetro de transistor.....	64
3.4	Célula triaxial automática (GDS instrument Ltd.).....	66
3.5	Desarrollo de una célula edométrica con control de succión.....	67
3.5.1	Edómetro convencional.....	67
3.5.2	Desarrollo de la nueva célula edométrica con control de succión.....	67
3.5.2.1	Descripción del nuevo edómetro con control de succión.....	67
3.5.2.1.1	Descripción de la célula edométrica.....	67
3.5.2.1.2	Equipos complementarios.....	69
3.5.3	Calibración mecánica: deformación de la célula edométrica.....	69
3.5.4	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua en los discos cerámicos AVEA.....	70
3.5.5	Determinación de la permeabilidad no saturada.....	71

3.6	Mini-célula isótropa rígida con control de la succión.....	74
3.6.1	Diagrama general. Modificaciones para ensayos isótropos.....	74
3.6.2	Variación de esfuerzo y control de las trayectorias de esfuerzos.....	74
3.7	Célula triaxial con control de la succión.....	75
3.7.1	Descripción del equipo.....	75
3.7.2	Medida de parámetros.....	76
3.7.2.1	Desplazamiento axial. Transductores LVDTs.....	77
3.7.2.2	Desplazamiento radial. Sensores láser electro – óptico.....	77
3.7.2.3	Esfuerzo vertical. Célula de carga.....	79
3.7.3	Sistema de adquisición de datos.....	82
 CAPÍTULO 4. SUELO USADO DURANTE LA INVESTIGACIÓN.....		111
4.1	Origen geológico y composición del suelo.....	111
4.1.1	Origen del suelo.....	111
4.1.2	Difracción de rayos X.....	111
4.1.3	Microscopia electrónica de barrido ambiental (ESEM).....	112
4.1.4	Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP).....	113
4.2	Ensayos de clasificación geotécnica.....	115
4.2.1	Granulometría.....	115
4.2.2	Límites de consistencia.....	116
4.2.3	Obtención de curvas humedad–densidad bajo diferentes valores de energía específica de compactación.....	117
4.3	Ensayos de compactación isótropa y técnicas de preparación de las diferentes estructuras de suelo usados en los ensayos.....	118
4.3.1	Ensayos de compactación estática bajo esfuerzo isótropo controlado.....	118
4.3.1.1	Procedimiento de ensayo y resultados.....	118
4.3.2	Técnica de preparación de las muestras usadas en los diferentes ensayos.....	118
4.3.3	Análisis de las curvas succión–grado de saturación y succión–humedad de compactación. Curva de retención.....	121
4.3.3.1	Introducción.....	122
4.3.3.2	Curva de retención.....	122
		122

4.4	Ensayos previos de comportamiento deformacional.....	123
4.4.1	Ensayos de colapso.....	123
4.4.1.1	Ensayos de colapso. Edómetro convencional.....	123
4.4.1.2	Ensayos de colapso. Célula edométrica con control de succión.....	124
4.4.2	Ensayos de compresión isótropa en suelos saturados.....	128
4.5	Ensayos previos de comportamiento de rotura en suelos saturados.....	130
4.5.1	Trayectorias de esfuerzos y programa de ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	130
4.5.2	Ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	133
 CAPÍTULO 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS.....		171
5.1	Introducción.....	171
5.2	Programa y trayectorias de los ensayos edométricos con control de succión.....	171
5.3	Programa y trayectorias de los ensayos isótropos realizados en la mini – célula isótropa rígida.....	175
5.4	Programa y trayectoria del ensayo isótropo realizado en la célula triaxial con control de succión.....	179
5.5	Programa de ensayos y trayectorias de esfuerzos de los ensayos triaxiales en muestras no saturadas.....	181
5.5.1	Programa y trayectorias de esfuerzos de los ensayos triaxiales realizados en la célula triaxial con control de succión.....	182
 CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		201
6.1	Resultados edométricos con control de succión.....	201
6.1.1	Introducción.....	201
6.1.2	Aspectos generales de las variables de estado de esfuerzo.....	201
6.1.3	Resultados de los ensayos.....	202
6.1.3.1	Ensayo EDO – 1.....	202
6.1.3.2	Ensayo EDO – 2.....	205

6.1.3.3	Ensayo EDO – 3.....	207
6.1.3.4	Ensayo EDO – 4.....	208
6.1.4	Comentarios finales.....	209
6.2	Resultados isótropos con control de succión.....	212
6.2.1	Ensayos isótropos: mini – célula isótropa rígida.....	212
6.2.1.1	Ensayos de humedecimiento bajo carga constante.....	212
6.2.1.2	Ensayos de humedecimiento - secado y carga - descarga.....	215
6.2.1.3	Comentarios finales.....	217
6.2.2	Ensayos isótropos: célula triaxial con control de succión.....	218
6.2.2.1	Trayectorias múltiples de humedecimiento–secado y carga– descarga.....	218
6.2.2.2	Comentarios finales.....	222
6.2.3	Comparación de resultados de la mini-célula isótropa y célula triaxial.....	223
6.3	Resultados triaxiales con control de succión.....	224
6.3.1	Introducción.....	224
6.3.2	Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IS.....	225
6.3.2.1	Etapas de compresión isótropa.....	225
6.3.2.2	Etapas de rotura.....	226
6.3.3	Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IWS.....	229
6.3.3.1	Etapas de compresión isótropa.....	230
6.3.3.2	Etapas de cambio de succión.....	230
6.3.3.3	Etapas de rotura.....	232
6.3.4	Líneas de estado crítico.....	234
6.3.5	Comentarios finales.....	235
6.4	Interpretación de los ensayos de compresión triaxial mediante el modelo elastoplástico BBM.....	237
6.4.1	Introducción.....	237
6.4.2	Reproducción de los resultados experimentales.....	239
6.4.3	Comentarios finales.....	240

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	343
7.1 Resumen y conclusiones.....	343
7.1.1 Características del material ensayado.....	343
7.1.2 Equipo de laboratorio desarrollado.....	345
7.1.3 Resultados de los ensayos mecánicos con succión controlada.....	346
7.2 Líneas futuras de investigación.....	348
REFERENCIAS.....	351
<i>Anexo A. Procedimiento de ensayos edométricos con control de succión.....</i>	<i>361</i>
<i>Anexo B. Procedimiento de ensayos isótropos con control de succión. Mini – célula isótropa rígida.....</i>	<i>369</i>
<i>Anexo C. Procedimiento de ensayos isótropos y triaxiales en muestras no saturadas.....</i>	<i>379</i>
<i>Anexo D. Resultados experimentales.....</i>	<i>389</i>
D.1 Ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	389
D.2 Ensayos triaxiales en muestras no saturadas.....	389

El objetivo principal de esta investigación se centra en el estudio del comportamiento hidromecánico asociado a los cambios de succión y esfuerzo neto de un suelo colapsable. Se definió cuidadosamente un programa de ensayos de laboratorio con una variedad de trayectorias de esfuerzo y de succión que reprodujeran respuestas de interés para el avance del conocimiento de los suelos no saturados. Los resultados de los ensayos se interpretaron de acuerdo con un marco conceptual de endurecimiento elastoplástico (Alonso, *et al*, 1990).

Para la investigación se escogió una arcilla de baja plasticidad de la ciudad de Barcelona, con una estructura preparada artificialmente y compactada estáticamente en condiciones isotropas (esfuerzo controlado). Este método de fabricación de muestras tiene por objeto controlar la presión de preconsolidación en la estructura del suelo, y evitar una fabricación anisótropa. La succión total de las muestras después de la compactación se midió empleando la técnica psicrométrica. Con este procedimiento de fabricación se conoce la historia de esfuerzo y de succión de las muestras, y se establecen unas condiciones iniciales precisas. La estructura de las muestras preparadas artificialmente se caracterizó mediante porosimetría de intrusión de mercurio, microscopía electrónica, y una serie de ensayos mecánicos previos.

Se diseñó y construyó una nueva célula edométrica con control de la succión matricial mediante la aplicación de la técnica de traslación de ejes. Se puso a punto una célula triaxial existente con control de succión para la aplicación de un esfuerzo desviador, y la realización de ensayos de compresión triaxial a deformación controlada. La célula triaxial, totalmente instrumentada, permite registrar la evolución temporal del esfuerzo desviador (a través una célula de carga interna compensada a presión); el contenido de agua de la muestra (mediante dos buretas conectadas a ambos discos cerámicos de AVEA); las deformaciones axiales (con dos LVDT locales); las deformaciones radiales y las isócronas de los perfiles laterales (a través de sensores láser electro-ópticos) (Romero, 1999; Barrera, *et al*, 2002). En la técnica de traslación de ejes se mantuvo constante la presión de aire (u_a) y se varió la presión de agua (u_w) hasta alcanzar una diferencia igual a la succión matricial deseada ($u_a - u_w$), aplicando un rango de succiones entre 10 y 800 kPa. Los equipos se calibraron cuidadosamente desde un punto de vista mecánico e hidráulico.

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo bajo trayectorias de esfuerzo que incluyeron variaciones de la succión matricial, del esfuerzo medio/vertical neto y del esfuerzo desviador. Los principales aspectos estudiados fueron la dependencia del estado del suelo con la trayectoria de esfuerzos seguida; los colapsos y expansiones del suelo al variar la succión, y los estados de sobreconsolidación generados por un proceso mecánico (incrementos del esfuerzo neto) o hidráulico (cambios de succión).

El comportamiento de cambio de volumen (colapso, expansión y retracción) de las muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas, se estudiaron mediante ensayos edométricos e isotropos (mini-célula isotropa y célula triaxial) con control de la succión. Se analizó la influencia del estado inicial, así como los efectos del esfuerzo neto aplicado y los cambios de succión en el comportamiento volumétrico, la permeabilidad y las características de retención del agua. Es

importante resaltar que son pocos los estudios sobre colapsabilidad realizados bajo condiciones isotrópicas y triaxiales (Kato & Kawai, 2000; Barrera, *et al*, 2000; Romero, *et al.*, 2002).

En los ensayos de estados de esfuerzos en condiciones edométricas e isotrópicas se observaron pautas de comportamiento reversible e irreversible en relación con los cambios de volumen (colapso, expansión y retracción). Se constató la existencia de deformaciones plásticas importantes y de cambios irreversibles en el contenido de agua, asociados a las trayectorias de hidratación y secado, así como en las trayectorias de carga y descarga.

Asimismo, se estudió el comportamiento hidro-mecánico durante la aplicación de un esfuerzo desviador a succión constante, analizando la respuesta esfuerzo-deformación, el acoplamiento hidráulico y determinando los parámetros de resistencia al corte. Existen pocos estudios experimentales que hayan analizado dicho acoplamiento hidro-mecánico durante la etapa de corte (Rampino, *et al*, 1999, Rampino, *et al*, 2000, Wheeler & Sivakumar, 2000). Por otro lado, pese al indudable desarrollo de nuevos equipos triaxiales con succión controlada, se han reportado pocos resultados experimentales con relación a la evolución de la deformación axial y radial en forma local y global durante la etapa de corte en suelos no saturados. El estudio experimental consistió en un programa de ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante, bajo confinamiento y succión constantes. Se analizaron muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas. El estado sobreconsolidado se indujo por tres diferentes mecanismos previos a la etapa de corte: por un proceso mecánico de carga y descarga isotrópica a succión constante; por un proceso hidráulico de humedecimiento y secado bajo esfuerzo medio neto constante con una deformación de colapso dominante; y, finalmente, por otro proceso hidráulico de secado y humedecimiento bajo condiciones libres de retracción y expansión. La respuesta al corte de las muestras normalmente consolidadas se ha estudiado para el nivel máximo de esfuerzo medio neto alcanzado por la muestra, y en trayectorias previas de colapso.

Durante la etapa de corte las muestras presentaron inicialmente un comportamiento volumétrico contractante, y posteriormente exhibieron dilatación sin que se detectara evidencia de reblandecimiento del suelo. Asimismo, en todas las muestras, se observó inicialmente expulsión de agua hasta alcanzar un valor estable sin que se detectaran signos de entrada de agua durante la etapa final de dilatación. A partir de los resultados de los ensayos se ha establecido la existencia de una línea de estado crítico en términos de esfuerzo medio neto, de esfuerzo desviador y de relación de vacíos, cuya posición depende del valor de la succión. Por otro lado, se detectó el incremento de tamaño de la superficie de fluencia debido a las deformaciones irreversibles inducidas por un proceso hidráulico (humedecimiento y secado, secado y humedecimiento) o mecánico (carga y descarga isotrópica). También se ha observado un aumento de la rigidez y de la resistencia al incrementar la succión.

Los resultados experimentales se analizaron utilizando el modelo de endurecimiento elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990), que se basa en conceptos de estado crítico. Se han determinado los parámetros del suelo asociados con dicho modelo y se han simulado algunas trayectorias de esfuerzo, que han servido para validar su capacidad para reproducir la respuesta de un suelo no saturado. La comparación de los resultados experimentales y la simulación numérica en las trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga mostraron una buena correspondencia cualitativa y cuantitativa. En lo que respecta a las etapas de corte, el modelo ha reproducido adecuadamente la respuesta esfuerzo-deformación y ha capturado los efectos de la sobreconsolidación mecánica e hidráulica. Sin embargo, el comportamiento dilatante observado en las etapas finales de corte no ha podido simularse satisfactoriamente.

Algunas aportaciones del presente trabajo se han presentado en diversas conferencias y simposios internacionales durante los últimos meses. A continuación se presentan las referencias de estos trabajos.

- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A. & Vaunat, J. (2002). Hydro-mechanical Behaviour of a Clayey Silt During Controlled-suction Shearing. *International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, Brazil, A A Balkema, Rotterdam Vol 2: 485-490.
- Barrera, M., Romero, E., Sánchez, M. & Lloret, A. (2002). Laboratory Test to Validate and Determine Parameters of an Elastoplastic Model for Unsaturated Soils. *International Symposium on Identification and Determination of Soil and Rock Parameters for Geotechnical Design*. Paris, France, September 2002.
- Barrera, M., Romero, E., Sánchez, M. & Lloret, A. (2002). Comportamiento Mecánico de un Suelo no Saturado en Condiciones Triaxiales. Estudio experimental y modelación. *XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, Qro.*, Vol 2: 201-208.
- Barrera, M., Romero, E., Sánchez, M. & Lloret, A. (2002). Comportamiento Hidro-mecánico de un Suelo Colapsable en Condiciones Edométricas. *XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, Qro*, Vol 2: 193 - 201.
- Barrera, M., Garnica, P. & Martínez, F. (2003). Comportamiento del Fenómeno del Colapso en Suelos Compactados y su Influencia en las Vías Terrestres. *Tercer Congreso Mexicano del Asfalto. Desempeño de los pavimentos asfáltico*, México, D. F.
- Barrera, M., Romero, A., Gens, M. & Lloret, A. (2003). Deformation Behaviour of Anisotropic and Isotropic Compacted Soils Due to Wetting. *3rd Internacional Symposium on Deformation Characteristics of geomaterials, Lyon September, 2003*.

ABSTRACT

The main objective of this research work focuses on the study of the hydro-mechanical behaviour associated with changes in suction and net stress in a collapsible soil. A laboratory test program was carefully defined using different stress and suction paths, with the aim of enriching the existing body of knowledge regarding unsaturated soil behaviour. The results from the tests were interpreted by means of an elastoplastic hardening model previously developed in the Geotechnical Department (Barcelona Basic Model).

A low plasticity clay, with an artificially prepared structure, statically compacted under isotropic conditions (controlled stress conditions), was chosen for this investigation. After compaction, the total suction of the samples was measured using transistor psychrometers. This preparation method allowed to know the stress and suction history of the samples and their precise initial conditions. The structure of the samples was characterised using mercury intrusion porosimetry, electronic microscopy and a series of previous mechanical tests.

A new controlled-suction oedometer cell was developed and the existent triaxial cell was upgraded in order to carry out triaxial compression tests with controlled suction under constant strain rate.

These controlled-suction isotropic and oedometer tests allowed the study of the volumetric response (collapse, swelling and shrinkage) of normally consolidated and overconsolidated samples. The influence of the initial state was analysed, as well as the effects of applied net stress and the changes of suction in the volumetric behaviour, the permeability and the water retention properties. These tests showed reversible and irreversible features regarding volume change behaviour. Significant plastic strains and irreversible changes in water content, associated with the wetting-drying paths and loading-unloading paths, were observed.

Likewise, the hydro-mechanical response was studied during the application of a deviatoric stress at constant suction, thus analysing the stress-strain response and the hydraulic coupling, and determining the shear strength parameters in normally consolidated and overconsolidated samples. The research consisted in a program of strain-controlled triaxial compression tests under constant confinement and suction. The overconsolidated state was induced before the shearing phase by means of a hydraulic process (wetting-drying and drying-wetting paths) and a mechanical process (loading-unloading path). The response to shearing of normally consolidated samples was studied for the cases in which the sample achieved a maximum level of mean net stress, as well as after wetting paths with dominant collapsible strains. During the shearing phase, the samples initially presented compressive volumetric response, while afterwards they showed dilatancy without evidencing any strain softening. Furthermore, in all samples, there was an initial water outlet that attained a stable value after the compressive phase, although any water inlet was detected during the final dilative phase. Test results showed the existence of a critical state line in terms of net mean stress, deviatoric stress and void ratio, whose position depends on the value of suction.

Experimental results were interpreted using the elastoplastic hardening model, which is based on critical state concepts. Soil parameters associated with this model were determined and some stress paths were simulated, which helped to validate the model capacity to reproduce the response of an unsaturated soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Componentes principales de cada una de las fases de un suelo no saturado (Yoshimi y Osterberg, 1963).....	45
Figura 2.2	Estructura de suelos no saturados (Wroth & Houlby, 1985).....	45
Figura 2.3	Estructura del suelo (adaptado de Alonso <i>et al.</i> , 1987).....	46
Figura 2.4	Hinchamiento y colapso para un mismo suelo (Jennings y Kenight, 1975).....	46
Figura 2.5	Máximo colapso según Yudhbir (1982).....	47
Figura 2.6	Variación del hinchamiento y del colapso con la densidad seca y presión aplicada después de inundar (Cox, 1978).....	47
Figura 2.7	Variación del hinchamiento y del colapso después de inundar con la humedad de compactación y la densidad seca (Cox, 1978).....	48
Figura 2.8	Hinchamiento en procesos de compactación al inundar tras secar al aire (Holtz, 1959).....	48
Figura 2.9	Variación del hinchamiento con la densidad seca al compactar a diferentes humedades (Giziensky y Lee, 1965).....	49
Figura 2.10	Expansión y colapso durante el humedecimiento de dos muestras compactadas (Escario y Sáez, 1973).....	49
Figura 2.11	Efecto de la carga y del contenido de agua en la deformación volumétrica. Resultados obtenidos mediante el ensayos de doble edómetro, con muestras compactadas mediante impactos al 80 % de compactación relativa (Lawton <i>et al.</i> , 1989).....	50
Figura 2.12	Extensión de la envolvente de falla de Mohr – Coulomb (Fredlund, Morgenstern y Widger, 1978).....	50
Figura 2.13	Resistencia a la falla vs. Succión y esfuerzo normal neto para la arena arcillosa de Madrid (Escario y Sáez, 1986).	51
Figura 2.14	Valor de λ^b contra succión (Gan, Fredlund y Rahardjo, 1988).....	51
Figura 2.15	Estructuras de suelos compactados.....	52
Figura 2.16	El efecto del contenido de agua sobre estructuras de suelos compactados (Lambe, 1958).....	52
Figura 2.17	Técnicas experimentales de aplicación de succión. Rangos típicos de succión aplicada. Tiempos de equilibrado aproximados para suelos arcillosos con una distancia de drenaje de 10 mm (Gens y Romero, 2000).....	53
Figura 2.18	Calibración de la presión osmótica de soluciones de PEG con diferentes masas moleculares (Gens y Romero, 2000).....	54
Figura 2.19	Aire disuelto a través del disco cerámico a diferentes condiciones de presión de aire u_a y agua u_w (nueva Célula edométrica con control de succión).....	54
Figura 2.20	Aire disuelto a través del disco cerámico a diferentes condiciones de presión de aire u_a y agua u_w (Cámara Triaxial con succión controlada).....	55
Figura 2.21	Edómetro con control de succión (Lloret, 1982). Célula edométrica, medidor de cambio de agua y sistema de presión, no estan a la misma escala.....	56
Figura 2.22	Célula edométrica con control de succión y esfuerzo lateral (Romero, 1999).....	56

Figura 2.23	Célula triaxial modificada para ensayos con suelos parcialmente saturados (Bishop y Donald, 1961).....	57
Figura 2.24	Célula triaxial para suelos no saturados (Carvalho, 2001).....	57
Figura 2.25	Superficies de estado para el índice de vacíos y grado de saturación (Matyas y Radakrishna, 1968).....	58
Figura 2.26	Representación de un criterio de falla genérico en el espacio de tensiones principales (citado por Josa, 1988). a) reblandecimiento del suelo, b) rigidización y reblandecimiento del suelo y caso de plasticidad perfecta.....	58
Figura 2.27	Modelo de estado crítico.....	59
Figura 2.28	Variación del volumen específico v con p y s en curvas de carga y descarga según Alonso <i>et al.</i> , (1990).....	59
Figura 2.29	Superficie de fluencia asociada a p_0^* (Alonso <i>et al.</i> , 1990).....	60
Figura 2.30	Superficie de fluencia en los planos (p,q) y (s,p)	60
Figura 2.31	Superficie de fluencia del BBM en el espacio (p, q, s)	61
Figura 3.1	Aislador térmico con las sondas psicrométricas en serie.....	85
Figura 3.2a	Parte inferior de la sonda y sus elementos.....	85
Figura 3.2b	La sonda y el aislante térmico.....	86
Figura 3.3	Curvas de calibración para las sondas del Psicrómetro transistor.....	86
Figura 3.4	Sistema de ensayos triaxiales: (1) célula triaxial, (2) control axial, (3) adquisición de datos y acondicionamiento de señal, (4) controladores digitales de presión y volumen.....	87
Figura 3.5	Triaxial automático (GDS Instruments Ltd).....	87
Figura 3.6	Controlador digital de presión y volumen, utilizados para imponer presión de confinamiento y presión de cola.....	88
Figura 3.7	Edómetro con control de succión matricial (u_a-u_w) y total (Φ).....	88
Figura 3.8	a) disco cerámico (AVEA), b) combinación disco cerámico (AVEA) y piedra porosa, c) diseño de la base para la eliminación del aire disuelto a través del disco cerámico como consecuencia de la utilización de la técnica de traslación de ejes.....	89
Figura 3.9	Bureta graduada para medir la variación del volumen de agua intersticial, elemento interface para la aplicación de la presión de agua e interceptor de burbujas de aire (IBA).....	89
Figura 3.10	Esquema de la nueva célula edométrica con control de succión matricial y succión total.....	90
Figura 3.11	Deformación de la célula edométrica con control de succión.....	91
Figura 3.12	Relación teórica entre diafragma o presión del pistón y carga vertical neta transmitida.....	91
Figura 3.13	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA:1.5 MPa) (célula edométrica).....	92
Fig. 3.14a	Piezas especiales para saturación y determinación de la permeabilidad (No 1 y 2) de los discos cerámicos (AVEA) del pedestal y cabezal (célula triaxial con control de succión).....	93

Fig. 3.14b	Esquema del montaje del cabezal de la célula triaxial para saturar el disco cerámico.....	93
Figura 3.15	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico (mini-célula isótropa rígida).....	94
Figura 3.16	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico del cabezal y pedestal (cámara triaxial con succión controlada).....	95
Figura 3.17	Variación de la permeabilidad no saturada en función del grado de saturación al variar la estructura de la arcilla. Ensayos edométricos.....	96
Figura 3.18	Esquema básico de la Mini-célula isótropa rígida con control de succión.....	97
Figura 3.19	1) Cuerpo superior (cámara de confinamiento 29 mm de espesor, 2) Muestra montada en el pedestal, 3) cuerpo inferior de la mini-célula con control de succión.....	97
Figura 3.20	Conexiones entre la mini-célula isótropa básica y los equipos complementarios..	98
Fig. 3.21a	Esquema de la Célula triaxial con control de succión.....	99
Fig. 3.21b	Foto de la célula triaxial con control de succión.....	100
Figura 3.22	a) Célula de carga roscada entre el cabezal y pistón superior; b) Pieza de alineación no-contacto en la ejecución de los ensayos isótropos.....	100
Figura 3.23	Esquema del sistema de aplicación de la presión de aire y agua (combinación del disco cerámico (AVEA) y anillo poroso).....	101
Figura 3.24	Cámara y tapa de la célula triaxial con control de succión.....	101
Figura 3.25	Esquema del montaje de los LVDTs miniatura internos.....	102
Figura 3.26	Calibración de los LVDTs miniatura internos.....	102
Figura 3.27	a) Esquema del cabezal sensor de deformación radial y técnica de triangulación óptica. b) Efecto de la refracción sobre el cabezal sensor.....	103
Figura 3.28	Calibración LVDTs externos (desplazamiento vertical de los sensores láser).....	103
Figura 3.29	Ajuste de la salida de señal eléctrica antes de realizar el programa de calibración de los sensores láser.....	104
Figura 3.30	Deformación de la cámara de metacrilato bajo presiones de confinamiento.....	105
Figura 3.31	Sensibilidad de los sensores láser bajo diferentes presiones de confinamiento.....	105
Figura 3.32	Esquema del sistema de imposición de la tensión axial sobre la muestra, por medio de un pistón roscable controlado por un motor reductor de corriente continua controlando el desplazamiento del pistón de carga.....	106
Figura 3.33	Relación entre velocidad del motor reductor y el desplazamiento del pistón de carga.....	107
Figura 3.34	Expresión teórica y experimental entre ω_1 y ω_p . Factor de sensibilidad de la señal en (mV) de la célula de carga a fuerza (kN).....	107
Figura 3.35	Comparación entre datos teóricos y experimentales.....	108
Figura 3.36	Fotografía de la célula de carga (SENSOTEC; capacidad 8.9 kN).....	108
Figura 3.37	Estabilidad de la célula de carga (mV) bajo cambios de presión de cámara.....	109
Figura 4.1	Esquema geológico de la ciudad de Barcelona (Vázquez-Suñé, E. 1998).....	135
Figura 4.2	Difracción de rayos – X de la arcilla de Barcelona.....	135
Figura 4.3	Microscopio electrónico de barrido ambiental Electroscan 2020 (ESEM).....	136

Figura 4.4a	Suelo compactado en condiciones isotropas ($\psi_d=1.65\text{g/cm}^3$, $w_0=11\div 0.2\%$ y $n=40\%$), aumento $\times 1000$	136
Figura 4.4b	Aumento de la Fig. 4.4a $\times 3000$, agregados de partículas.....	137
Figura 4.4c	Estructura del suelo colapsado bajo inundación ($\psi_d=1.53\text{g/cm}^3$, $w=8.0\%$ y $n=42\%$).....	137
Figura 4.4d	Estructura de suelo colapsado bajo el proceso de hidratación por etapas ($\psi_d=1.53\text{g/cm}^3$, $w=8.0\%$ y $n=42\%$).....	138
Figura 4.5	Porosímetro por intrusión de mercurio (Micromeritics).....	138
Figura 4.6	Intrusión acumulada de la relación de vacíos.....	139
Figura 4.7	Distribución del tamaño de poros para diferentes condiciones.....	139
Figura 4.8	Distribución de tamaños de partículas del suelo para diferentes condiciones (MIP).....	140
Figura 4.9	Superficie específica para diferentes condiciones usando la técnica MIP.....	140
Figura 4.10	Curva granulométrica para el suelo en estudio (CL de Barcelona).....	141
Figura 4.11	Carta de plasticidad.....	141
Figura 4.12	Curvas de compactación para diferentes niveles de energía específica.....	142
Figura 4.13	Procedimiento de compactación estática isotropa (esfuerzo controlada).....	143
Figura 4.14	Fotografías de las etapas del procedimiento de compactación isotropa.....	143
Figura 4.15	Curvas de compactación para tres presiones isotropas (para el suelo en estudio, arcilla de baja plasticidad de BCN). Las líneas sólidas indican los contornos de igual succión total después de la compactación.....	144
Figura 4.16	Comprobación del tiempo de aplicación de la presión isotropa y la disipación del exceso de la presión generada en los poros.....	145
Figura 4.17	Moldes cilíndricos utilizados para la fabricación de probetas en la primera etapa de la compactación estática en condiciones isotropas.....	145
Figura 4.18	Técnica de preparación de las muestras a ensayar ($\lambda=38\text{mm}$, $h=76\text{mm}$).....	146
Figura 4.19	Relación entre la succión total (Φ) y contenido de agua (w), para diferentes densidades secas (ψ_d) a porosidad constante (Técnica Psicrométrica).....	146
Figura 4.20	Curva de retención (succión vs. grado de saturación) a porosidad constante.....	147
Figura 4.21	Comparación de la relación succión total – grado de saturación obtenidas con la expresión de Van Genuchten y los datos experimentales (técnica psicrométrica)..	147
Figura 4.22	Condiciones iniciales: a) grupo de ensayos de colapso bajo inundación a carga constante (edómetro convencional); b) ensayos de colapso con y sin control de la succión matricial (nueva célula edométrica con control succión), y c) ensayos de compresión isotropa en muestras saturadas.....	148
Figura 4.23	Trayectoria de esfuerzo y succión, en los ensayos de carga isotropa y de colapso bajo inundación a carga constante, (ejemplo ensayo B1).....	149
Figura 4.24	Deformación de colapso para diferentes valores de carga vertical aplicada.....	149
Figura 4.25	Colapso en función de la densidad seca en el momento de la inundación para muestras con la misma humedad inicial (11%).....	150
Figura 4.26	Influencia de la succión inicial total (...) en la deformación de colapso.....	150
Figura 4.27	Variación de la deformación volumétrica en las trayectorias de carga, saturación y descarga, para los ensayos A1a y B1a.....	151
Figura 4.28	Variación de la deformación volumétrica, contenidos de agua y grados de saturación bajo esfuerzo vertical neto constante.....	151

Figura 4.29	Evolución en el tiempo de la deformación de colapso, volumen de entrada de agua para el ensayo (A1a) en el proceso de humedecimiento. Deformación de colapso en la etapa de intrusión de agua a presión atm. para el ensayo B1a.....	152
Figura 4.30	Relación entre volumen de agua – tiempo, para obtener la permeabilidad de la muestra y ratificar el 100 % de saturación de la misma.....	153
Figura 4.31	Relación porosidad – permeabilidad al agua. Ensayos de colapso.....	153
Figura 4.32	Comparación de la deformación volumétrica total entre los ensayos del grupo A (a succión controlada) y los ensayos del grupo B (intrusión de agua a presión atm.).....	154
Figura 4.33	Simulación de la evolución de la trayectoria de carga en los ensayos de colapso sin control de succión (Grupo B).....	154
Figura 4.34	Relación entre el índice de poro–esfuerzo vertical neto, succión matricial – esfuerzo vertical neto de los ensayos de colapso del grupo A (a succión controlada) y del grupo B (simulación de la evolución de la succión en los ensayos sin control de succión).....	155
Figura 4.35	Deformación de colapso para diferentes valores de densidad seca.....	156
Figura 4.36	Ensayos de compresión isótropa drenados en muestras saturadas.....	156
Figura 4.37	Deformación temporal de la muestra para diferentes incrementos de esfuerzo efectiva.....	157
Figura 4.38	Obtención de la presión de preconsolidación en muestras saturadas p_0^* (ensayo de compresión isótropa).....	157
Fig. 4.39a	Superficies de fluencia en los ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas de los ensayos 1 y 5.....	158
Fig. 4.39b	Reproducción mediante un modelo numérico de los ensayos de compresión isótropa 1 y 5.....	158
Fig.4.39c	Curva experimental versus la curva predicha de los ensayos de colapso bajo inundación a carga constante. Ensayos B1 y C4.....	159
Fig. 4.39d	Deformación de colapso medidas y predichas.....	159
Figura 4.40	Condiciones iniciales de las muestra. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (CD) realizados en la célula triaxial GDS instrument Ltd.....	160
Figura 4.41	Trayectoria de esfuerzo realizada para alcanzar el estado saturado de las muestras de los ensayos triaxiales (GDS intrument Ltd.).....	160
Figura 4.42	Trayectoria de esfuerzo 1. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (GDS).....	161
Figura 4.43	Trayectoria de esfuerzo 2. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (GDS).....	161
Figura 4.44	Trayectoria de esfuerzo 3 del ensayo triaxial CD-103.....	162
Figura 4.45	Trayectoria de esfuerzo 4 del ensayo triaxial CD-104.....	162
Figura 4.46	Obtención de puntos de la superficie de fluencia con la ejecución de las trayectorias tensionales 1 y 2. Célula triaxial estándar GDS.....	163
Figura 4.47	Variación del esfuerzo desviador (q), deformación de corte (κ_s), deformación volumétrica (κ_v) e incrementos de la presión de poros ($\div u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-101).....	164
Figura 4.48	Esfuerzo medio efectivo: deformación y esfuerzo desviador en la etapa de rotura (CD-101). Obtención de las coordenadas del punto de la superficie de fluencia (p_0^* , q).....	164

Figura 4.49	Variación del esfuerzo desviador (q), deformación de corte (κ_s), deformación volumétrica (κ_v) e incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-102).....	166
Figura 4.50	Esfuerzo medio efectivo: deformación y esfuerzo desviador en la etapa de rotura (CD-102). Obtención de las coordenadas del punto de la superficie de fluencia (p_0^* , q).....	167
Figura 4.51	Esfuerzo medio efectivo vs deformación axial y de corte (CD-102). Determinación de los módulos elásticos y la ordenada de un punto de la superficie de fluencia (q).....	167
Figura 4.52	Variación de los módulos elásticos con respecto a la presión de confinamiento (ω_3).....	168
Figura 4.53	Superficie de fluencia simétrica / elíptica en el plano $p': q$ (modelo Cam-Clay)...	168
Figura 4.54	Obtención del esfuerzo de preconsolidación (p_0^*) del ensayo CD-103.....	169
Figura 4.55	Obtención de los parámetros del suelo, esfuerzo de preconsolidación (p_0^*) y parámetros de compresibilidad ($\zeta(0)$, ρ) del ensayo CD-104.....	169
Figura 5.1	Condiciones iniciales de los ensayos edométricos con control de succión. Nueva célula edométrica con control de succión.....	189
Figura 5.2	Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-1.....	189
Figura 5.3	Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-2.....	190
Figura 5.4	Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-3.....	190
Figura 5.5	Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-4.....	191
Figura 5.6	Trayectoria de esfuerzos. Ensayos isótropos ISO-1 y ISO-2 (mini-célula isótropa rígida).....	191
Figura 5.7	Condiciones iniciales de las probetas fabricadas de los ensayos: a) isótropos realizados en la mini-célula isótropa rígida; b) ensayos isótropos realizados con el equipo triaxial con control de succión. Curvas de compactación estática en condiciones isótropas con contornos de igual succión.....	192
Figura 5.8	Trayectorias de esfuerzos de los ensayos isótropos ISOW (mini-célula isótropa rígida). ($r = 10$ mm, $h = 20$ mm: $h/r = 2$).....	193
Figura 5.9	Trayectoria de esfuerzos. Ensayo isótropo realizado en la célula Triaxial con control de succión. ($r = 19$ mm, $h = 76$: $h/r = 4$).....	193
Figura 5.10	Estado inicial de las muestras para los dos grupos de ensayos de compresión triaxial a variación de deformación constante ($v_q = 1$ σ m/min) en <i>muestras no saturadas</i> (IS, IWS) realizados en la célula triaxial con control de succión.....	194
Figura 5.11	Trayectoria de esfuerzo del ensayo (IS-OC-03) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1$ σ m/min, $u_a - u_w = 0.8$ MPa, $\omega_3 - u_a = 0.3$ MPa).....	194
Figura 5.12	Trayectoria de esfuerzos del ensayo (IS-NC-06) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1$ σ m/min, $u_a - u_w = 0.8$ MPa, $\omega_3 - u_a = 0.6$ MPa).....	195
Figura 5.13	Trayectoria de esfuerzos del ensayo (IS-NC-12) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1$ σ m/min, $u_a - u_w = 0.8$ MPa, $\omega_3 - u_a = 1.2$ MPa).....	195
Figura 5.14	Evolución de los ensayos para la determinación de la línea de estado crítico para un valor en particular de succión ($u_a - u_w = 0.8$ MPa).....	196

Figura 5.15	Trayectoria de esfuerzos del ensayo (IS-OC-06) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q=1 \sigma\text{m}/\text{min}$, $u_a-u_w=0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3-u_a=06 \text{ MPa}$).....	196
Figura 5.16	Trayectoria de esfuerzos para el ensayo IWS-OC-01 ($v_q=1 \sigma\text{m}/\text{min}$, $u_a-u_w=0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3-u_a=06 \text{ MPa}$).....	197
Figura 5.17	Trayectoria de esfuerzos para el ensayo IWS-NC-02 ($v_q=1 \sigma\text{m}/\text{min}$, $u_a-u_w=0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3-u_a=06 \text{ MPa}$).....	197
Figura 5.18	Transferencia de vapor asociada a la succión total ($\Phi=87 \text{ MPa}$) con una disolución salina saturada $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. a) probetas preparadas para el ensayo IWS-OC-87; b) probetas bajo atmósfera y humedad relativa impuestas por el procedimiento básico de difusión.....	198
Figura 5.19	Trayectoria de esfuerzos del ensayo de compresión triaxial (IWS-OC-87). Succión total ($\Phi=87 \text{ MPa}$ por transferencia de vapor (disolución salina saturada $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).....	199
Figura 6.1	Trayectorias de esfuerzos de humedecimiento–secado y carga–descarga realizados en el ensayo EDO-1. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables tensionales y volumétricas conjugadas).....	241
Figura 6.2	Variación de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de las diferentes etapas de equilibrio con relación a los cambios de succión, para el ensayo EDO-1.....	242
Figura 6.3	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento ($C \downarrow D$) bajo carga vertical constante ($\omega_v-u_a=0.6 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-1.....	243
Figura 6.4	Variación del índice de poros, relación de agua y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de esfuerzos de humedecimiento–secado y carga–descarga del Ensayo EDO-1.....	244
Figura 6.5	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de la trayectoria de carga ($E \downarrow F$) bajo succión matricial constante ($u_a-u_w=0.3 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-1.....	245
Figura 6.6	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de la trayectoria de descarga ($F \downarrow G$) bajo succión matricial constante ($u_a-u_w=0.3 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-1.....	246
Figura 6.7	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_v-u_a), ensayo EDO-1.....	247
Figura 6.8	Trayectorias de esfuerzos de humedecimiento–secado y carga–descarga realizados en el ensayo EDO-2. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables de esfuerzos y volumétricas conjugadas).....	248
Figura 6.9	Variación de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación en las diferentes etapas de equilibrio con relación a cambios de succión, ensayo EDO-2.....	249

Figura 6.10	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C↓ D) bajo carga vertical constante (ω_v-u_a)=0.6 MPa. Ensayo EDO-2.....	250
Figura 6.11	Variación del índice de poros, relación de agua y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de esfuerzo de humedecimiento – secado y carga – descarga del Ensayo EDO-2.....	251
Figura 6.12	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_v-u_a), ensayo EDO-2.....	252
Figura 6.13	Trayectorias de esfuerzos de humedecimiento – secado y carga – descarga realizados en el ensayo EDO-3. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables de esfuerzos y volumétricas conjugadas).....	253
Figura 6.14	Variación de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación en las diferentes etapas de equilibrio con relación a los cambios de succión, ensayo EDO-3.....	254
Figura 6.15	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C↓ D) bajo carga vertical constante (ω_v-u_a)=0.3 MPa. Ensayo EDO-3.....	255
Figura 6.16	Variación del índice de poros, relación de agua y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de humedecimiento – secado y carga – descarga del ensayo EDO-3.....	256
Figura 6.17	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga-descarga y humedecimiento-secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_v-u_a), ensayo EDO-3.....	257
Figura 6.18	Trayectorias de humedecimiento – secado y carga – descarga en el ensayo EDO-4. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables de esfuerzos y volumétricas conjugadas).....	258
Figura 6.19	Variación de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de las diferentes etapas de equilibrio, ensayo EDO-4.....	259
Figura 6.20	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C↓ D) bajo carga vertical constante (ω_v-u_a)=0.6 MPa. Ensayo EDO-4.....	260
Figura 6.21	Variación del índice de poros, relación de agua y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de humedecimiento – secado y carga – descarga del ensayo EDO-4.....	261
Figura 6.22	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_v-u_a), ensayo EDO-4.....	262
Figura 6.23	Variación de la deformación volumétrica y relación de agua en las diferentes etapas de equilibrio de los ensayos edométricos en la trayectoria de humedecimiento y secado.....	263
Figura 6.24	Variación de la succión matricial e índice de poros con respecto a la relación de agua de los ensayos edométricos (trayectoria de esfuerzos de A hasta E).....	264

Figura 6.25	Variación del índice de poros, relación de agua y grado de saturación con respecto al esfuerzo vertical neto de los ensayos edométricos (A ↓ F).....	265
Figura 6.26	Valores de ζ_{edo} y ρ_{edo} a diferente succión matricial. Ensayos edométricos en trayectorias de carga y descarga.....	266
Figura 6.27	Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de esfuerzos (p, q, s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia para los ensayos edométricos en las trayectorias (B ↓ C) y (C ↓ D).....	266
Figura 6.28	Resultados isotropos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCD ensayo ISOW-1.....	267
Figura 6.29	Resultados isotropos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria ABCD ensayo ISOW-2.....	268
Figura 6.30	Resultados isotropos representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCD ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).....	269
Figura 6.31	Resultados isotropos representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCDE ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotropa).....	270
Figura 6.32	Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.3$ MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-1 (Mini-célula isotropa).....	271
Figura 6.33	Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.3$ MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-2 (Mini-célula isotropa).....	272
Figura 6.34	Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.2$ MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).....	273
Figura 6.35	Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.3$ MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotropa).....	274
Figura 6.36	Intersección de la superficie de fluencia inicial de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-1 (Mini-célula isotropa)....	275
Figura 6.37	Intersección de la superficie de fluencia inicial de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-2 (Mini-célula isotropa)....	276
Figura 6.38	Intersección de la superficie de fluencia de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).....	277
Figura 6.39	Intersección de la superficie de fluencia de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotropa).....	278
Figura 6.40	Resultados isotropos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCDEFG ensayo ISO-1.....	279
Figura 6.41	Resultados isotropos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria ABCDEFG ensayo ISO-2.....	280
Figura 6.42	Trayectoria de humedecimiento y secado a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa. Trayectoria BCDEFG ensayo ISO-1 (Mini-célula isotropa).....	281
Figura 6.43	Trayectoria de humedecimiento y secado a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa. Trayectoria ABCDEFG ensayo ISO-2 (Mini-célula isotropa).....	282
Fig. 6.44a	Variación del índice de e , e_w y e_w/e en las trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga. Trayectoria BCDEFG ensayo ISO-1 (Mini-célula isotropa).....	283
Fig. 6.44b	Variación de e , e_w y e_w/e durante el ciclo de carga-descarga. Trayectoria EFG ensayo ISO-1 (Mini-célula isotropa).....	284

Fig. 6.45a	Variación del índice de e , e_w y e_w/e en las trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga. Trayectoria BCDEFG ensayo ISO-2 (Mini-célula isótropa).....	285
Fig. 6.45b	Variación de e , e_w y e_w/e durante el ciclo de carga-descarga. Trayectoria EFG ensayo ISO-2 (Mini-célula isótropa).....	286
Figura 6.46	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_m-u_a), ensayo ISO-1.....	287
Figura 6.47	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_m-u_a), ensayo ISO-2.....	288
Figura 6.48	Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de esfuerzos (p , q , s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia (LC) para los ensayos isótropos ISO-1 y ISO-2.....	289
Figura 6.49	Resultados isótropos ISO-1 y ISO-2, en el plano $\kappa_v : s : e_w : e : \omega_m-u_a$	290
Figura 6.50	Resultados isótropos obtenidos con la Célula Triaxial, representados en el plano $s : (\omega_m-u_a) : e_w : e$. Trayectorias de humedecimiento-secado, carga-descarga. Ensayo TISO-1.....	291
Figura 6.51	Evolución en el tiempo de las deformaciones, contenidos de agua y grados de saturación en una etapa de humedecimiento: $(u_a-u_w)_0 = 0.10$ MPa \Downarrow $(u_a-u_w)_f = 0.02$ MPa. Ensayo TISO-1.....	292
Figura 6.52	Variación de la deformación axial, radial, de corte y volumétrica y cambios en contenidos de agua y grados de saturación en un ciclo de humedecimiento-secado bajo tensión media constante $(\omega_m-u_a) = 0.6$ MPa. Ensayo TISO-1.....	293
Fig. 6.53a	Variación de la deformación axial, radial (local y global), volumétrica (local y global), contenidos de agua y grados de saturación en trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga. Ensayo TISO-1 (Célula triaxial).....	294
Fig. 6.53b	Variación de la deformación volumétrica y la relación de agua durante los ciclos de carga–descarga. Trayectorias EFG y HIJ, ensayo TISO-1 (Célula triaxial).....	295
Figura 6.54	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga–descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , ω_m-u_a), ensayo TISO-1.....	296
Figura 6.55	Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de los esfuerzos (p , q , s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia (LC) para el ensayo isótropo TISO-1.....	297
Figura 6.56	Valores de ζ , ζ_{edo} , ρ , y ρ_{edo} a diferente succión matricial, de los ensayos isótropos y edométricos en trayectorias de carga y descarga.....	297
Figura 6.57	Perfiles de las deformaciones laterales en las etapas de humedecimiento y secado bajo esfuerzo medio constante $(\omega_m-u_a) = 0.06$ MPa. Trayectoria BCDE, TISO-1.....	298
Figura 6.58	Perfiles de las deformaciones laterales del primer ciclo de carga – descarga a succión constante ($u_a-u_w = 0.15$ MPa). Trayectoria EFG, TISO-1.....	298
Figura 6.59	Perfiles de las deformaciones laterales de la segunda etapa de carga bajo succión constante ($u_a-u_w = 0.02$ MPa). Trayectoria H-I, TISO-1.....	299
Figura 6.60	Perfiles de las deformaciones laterales recuperables de la descarga final del ensayo bajo succión constante ($u_a-u_w = 0.02$ MPa). Trayectoria I-J, TISO-1.....	299

Figura 6.61	Resultados isotropos obtenidos con la mini-célula y célula triaxial, representados en el plano $s : (\omega_n - u_a) : e_w : e$. Ensayos ISO-1 y TISO-1.....	300
Figura 6.62	Variación de la deformación volumétrica y cambios en contenidos de agua y grados de saturación en un ciclo de humedecimiento-secado bajo esfuerzo medio constante ($\omega_n - u_a = 0.6$ MPa). Ensayos ISO-1 y TISO-1.....	301
Figura 6.63	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Ensayos ISO-1 y TISO-1.....	302
Figura 6.64	Trayectoria de carga isotropa (A \Downarrow B) a succión constante. Ensayo de compresión triaxial IS – NC – 12.....	303
Figura 6.65	Ciclo de carga – descarga isotropa (A \Downarrow B \Downarrow C) a succión constante. Ensayo de compresión triaxial IS – OC – 06.....	304
Figura 6.66	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-NC-06.....	305
Figura 6.67	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-NC-12.....	306
Figura 6.68	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-OC-03.....	307
Figura 6.69	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-OC-06.....	308
Figura 6.70	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica local y global de los ensayos del grupo IS, en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.....	309
Figura 6.71	Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IS – NC – 06.....	310
Figura 6.72	Variación en la dirección del incremento de las deformaciones plásticas como una función de p para $tq / tp = 3$ y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IS – NC – 06.....	311
Figura 6.73	Superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – NC – 06.....	312
Figura 6.74	Variación en la dirección del incremento de las deformaciones plásticas como una función de p para $tq / tp = 3$ y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IS – NC – 12.....	313
Figura 6.75	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – NC – 12.....	314
Figura 6.76	Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IS – OC – 06.....	315
Figura 6.77	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – OC – 06.....	316
Figura 6.78	Deformación volumétrica en una trayectoria de secado a una succión total ($\Phi = 87$ MPa). Trayectoria de carga isotropa (A \Downarrow B) a succión matricial constante ($u_a - u_w = 0.8$ MPa). Ensayo de compresión triaxial IS – NC – 12.....	317

Figura 6.79	Resultados de compresión triaxial obtenidos con la célula triaxial representados en los planos $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria de carga isotrópica (A-B) y ciclo de humedecimiento – secado (B-C-D). Ensayo IWS – OC – 01.....	318
Figura 6.80	Resultados de compresión triaxial obtenidos con la célula triaxial representados en los planos $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria de carga isotrópica (A-B) y de humedecimiento (B-C). Ensayo IWS – NC – 02.....	319
Fig. 6.81a	Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 87.....	320
Fig. 6.81b	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial SI a $\Phi = 87$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 87.....	321
Figura 6.82	Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 01.....	322
Figura 6.83	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 01.....	323
Figura 6.84	Superficie de fluencia inicial ($s = 0.8$ MPa) y superficie de fluencia a $s = 0.02$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte a una $s = 0.02$ MPa. Ensayo IWS – NC – 02.....	324
Figura 6.85	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial (IWS – OC – 87).....	325
Figura 6.86	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial (IWS – OC – 01).....	326
Figura 6.87	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial (IWS – NC – 02).....	327
Figura 6.88	Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IWS – OC – 01.....	328
Figura 6.89	Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica local y global de los ensayos del grupo IWS, en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.....	329
Figura 6.90	Línea de estado crítico en muestras no saturadas ($s = 0.8$ MPa) en el plano esfuerzo desviador – esfuerzo medio neto.....	330
Figura 6.91	Línea de estado crítico en muestras a succión constante ($s = 0.8$ MPa y $s = 0.02$ MPa) y en muestras saturadas en el plano esfuerzo desviador – esfuerzo medio neto.....	330
Figura 6.92	Línea de estado crítico en el plano $\ln(\omega_m - u_a) : e$ en muestras a succión constante ($s = 0.8$ MPa) y en muestras saturadas.....	331
Figura 6.93	Resultado de los ensayos del grupo IS y IWS en la etapa de rotura. Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica local y global en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.....	332

Fig. 6.94a	Influencia del incremento de la succión en los ensayos y la rigidez de las muestras sobreconsolidadas por un proceso hidráulico y mecánico antes de la etapa de corte.....	333
Fig. 6.94b	Variación del índice de poros con respecto a la relación de agua durante la etapa de rotura a succión constante ($s = 0.8$ MPa).....	334
Figura 6.95	Influencia de la succión sobre el módulo de Young (E).....	334
Figura 6.96	Influencia del grado de saturación sobre el módulo de Young (E).....	335
Figura 6.97	Influencia del esfuerzo media neta sobre el módulo de Young (E).....	335
Figura 6.98	Forma de la superficie de fluencia inicial para un esfuerzo de compactación isótropa de 0.6 MPa y una succión de 0.80 MPa para cada uno de los tres conjunto de parámetros utilizados en el trabajo de investigación.....	336
Figura 6.99	Simulación del ciclo de carga–descarga del ensayo IS-OC-06 (trayectoria A↓ B↓ C). Parámetros de compresibilidad elástico y elastoplástico.....	337
Fig. 6.100	Simulación del ciclo de humedecimiento–secado del ensayo IWS-OC-01 (trayectoria B↓ C↓ D). Parámetro de rigidez elástica para cambios en succión....	337
Fig. 6.101	Simulación del ciclo de secado–humedecimiento del ensayo IWS-OC-87. Parámetro de rigidez elastoplástico para cambios en succión.....	338
Fig. 6.102	Comparación entre resultados experimentales y calculados de la trayectoria de corte.....	339
Fig. 6.103	Simulación de las deformaciones volumétricas durante la etapa de corte.....	340
Fig. 6.104	Simulación de las deformaciones de corte de los ensayos IS-NC-06, IS-OC-06, IWS- OC- 01 y IWS-OC-87.....	341

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La Mecánica del Suelo se desarrolló inicialmente para estudiar los suelos saturados. Los estudios de estos suelos han sido abundantes, principalmente en los países desarrollados y de clima húmedo que han brindado grandes aportaciones al conocimiento de su comportamiento. Sin embargo, gran parte de las formaciones geológicas así como de las estructuras de tierra construidas por el hombre, son a base de materiales no saturados, existiendo incluso zonas en las que la condición de saturación no es ni siquiera previsible. Los suelos llamados problemáticos, tales como los suelos residuales, los suelos colapsables y los suelos expansivos, son ejemplos de materiales potencialmente no saturados. Estos suelos están sujetos a cambios de humedad de origen natural (variaciones climáticas) o artificial (actividad humana), que causan importantes modificaciones en su capacidad portante (resistencia y deformabilidad). Por ello, es preciso comprender el comportamiento geotécnico de los suelos naturales no saturados a fin de predecir, prevenir o minimizar accidentes naturales (inestabilidad de taludes, procesos de erosión y asentamientos).

Recientemente, tanto los suelos compactados como los rellenos de escombros han pasado a formar parte de los materiales no saturados a los que se enfrentan los ingenieros geotécnicos. Entender su comportamiento mecánico e hidráulico es de gran importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos, rellenos, diques, presas de tierra e incluso barreras de protección ambiental contra las emisiones contaminantes gaseosas y líquidas, ya que también están sometidos a cambios de humedad y modificaciones en su comportamiento a lo largo de su construcción y vida útil.

El estudio del comportamiento de los suelos no saturados ha sido objeto de numerosos trabajos de investigación en las últimas décadas, debido a las dificultades que implica la aplicación de la mecánica del suelo tradicional a los problemas geotécnicos que plantean dichos suelos. Por ejemplo, el principio de los esfuerzos efectivos, que constituye uno de los puntos básicos del comportamiento del suelo saturado, aplicado a los no saturados presenta dificultades que todavía no se han resuelto totalmente. Los problemas que entraña el conocimiento de la influencia de nuevas variables de esfuerzos, como la succión, los fenómenos de histéresis respecto a los cambios de humedad, los fenómenos acoplados hidro-mecánicos, los flujo no lineales y otros aspectos del comportamiento de los suelos no saturados, han llevado a mantener la aplicación de la teoría de los suelos saturados en los estudios y proyectos geotécnicos.

Actualmente, la investigación profundiza en el estudio de los suelos no saturados, y desarrolla una base teórica con nuevos conocimientos del comportamiento resistente, deformacional e hidráulico. Estos estudios pueden realizarse a través de diferentes procedimientos:

- 4 Observación directa del comportamiento del suelo, o construcciones cimentadas sobre ellos, mediante instrumentación y ensayos de campo, determinándose los parámetros necesarios para los análisis
- 4 Realización de ensayos en laboratorio, procurando reproducir los fenómenos reales, y analizando la influencia de determinados parámetros del suelo en su comportamiento. Es necesario con frecuencia desarrollar nuevos equipos de laboratorio que permitan el control del proceso de ensayo o la determinación de los parámetros más significativos

- 4 Elaboración de modelos generales de comportamiento que permitan predecir, con cierta confiabilidad y a partir del menor número posible de parámetros obtenidos en laboratorio, la respuesta del suelo a las sollicitaciones a las que se vea sometido

La relación entre estos procedimientos es clave, ya que es necesario que los resultados de los modelos constitutivos reproduzcan fielmente el comportamiento real en campo o en laboratorio.

El estudio de un acoplamiento hidro-mecánico asociado al comportamiento de cambio de volumen, y el contenido de agua en suelos no saturados ha sido objetivo de diversos estudios de investigación en los últimos años (Romero, 1999; Rampino, *et al*, 1999; Rampino, *et al*, 2000; Wheeler & Sivakumar, 2000). A pesar de los trabajos publicados sobre este tema, aún falta información sobre diversos aspectos que pueda contribuir a un mejor entendimiento del comportamiento que presentan estos suelos frente a cambios de esfuerzo y de succión.

1.2 Objetivos y metodología de la investigación

El objetivo principal de esta investigación es estudiar el comportamiento hidro-mecánico de un suelo colapsable asociado a los cambios de succión, esfuerzo neto y esfuerzo desviador. Se ha diseñado y llevado a cabo un programa de investigación experimental para conocer dichos aspectos. Se han realizado ensayos de laboratorio con una variedad de trayectorias de esfuerzos y de succión para reproducir respuestas de interés, que ayuden en el avance del conocimiento sobre los suelos no saturados. Los resultados de los ensayos se han interpretado de acuerdo con un marco conceptual de endurecimiento elastoplástico (Alonso, *et al.*, 1990; Barcelona Basic Model: BBM).

Dentro del programa experimental, se desarrolló un procedimiento de fabricación de muestras con una densidad seca y una humedad prefijadas a través de una compactación estática isótropa (esfuerzo controlado) en el interior de una célula triaxial, con objeto de controlar la presión de preconsolidación en la estructura del suelo y evitar una fabricación anisótropa. Tras la compactación se midió la succión total de cada muestra mediante un psicrómetro de transistores. Con este procedimiento se consiguen probetas de suelo de distinta forma y tamaño, todas ellas con una estructura isótropa y con una historia de esfuerzo conocida desde el inicio de su fabricación. El material ensayado fue una arcilla roja de Barcelona. Según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es una arcilla de bajo límite líquido ($w_L = 32 \%$, $w_P = 16 \%$), siendo su porcentaje de partículas de tamaño arcilloso, limoso y arenoso de 16.1 %, 44.5 % y 39.4 %, respectivamente.

Uno de los objetivos de esta investigación ha sido el diseño y construcción de una nueva célula edométrica con control de la succión matricial mediante la aplicación de la técnica de traslación de ejes. Se puso a punto una célula triaxial existente con control de succión para la realización de ensayos de compresión triaxial a deformación controlada. La célula triaxial, totalmente instrumentada, permite registrar la evolución temporal del esfuerzo desviador (a través una célula de carga interna compensada a presión); el contenido de agua de la muestra (mediante dos buretas conectadas a ambos discos cerámicos de AVEA); las deformaciones axiales (con dos LVDT locales); las deformaciones radiales y las isócronas de los perfiles laterales (a través de sensores láser electro-ópticos) (Romero, *et al*, 1997; Romero, 1999; Barrera, *et al*, 2002).

Asimismo, se estudió el comportamiento de cambio de volumen (colapso, expansión y retracción) de muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas mediante ensayos edométricos e isótropos con control de la succión (mini-célula isótropa y célula triaxial). Se ha analizado la influencia del estado inicial, así como los efectos del esfuerzo neto aplicado, y los cambios de succión en el comportamiento volumétrico, la permeabilidad y las características de retención de agua. Es importante resaltar que son pocos los estudios sobre colapsabilidad realizados bajo condiciones isótropas y triaxiales (Kato & Kawai, 2000; Barrera, *et al*, 2000; Romero, *et al*, 2002).

El programa de ensayos también se enfocó al estudio del comportamiento hidro-mecánico durante diferentes etapas de corte, así como a determinar los parámetros de resistencia al corte y al análisis de la respuesta mecánica esfuerzo-deformación. Es importante indicar que pocos estudios experimentales se han centrado en el acoplamiento hidro-mecánico durante la etapa de corte (Rampino, *et al*, 1999; Rampino, *et al*, 2000; Wheeler & Sivakumar, 2000). Por otro lado, son pocos los resultados experimentales reportados en relación a la evolución de la deformación axial y radial en forma local y global durante la etapa de corte.

El estudio experimental del efecto de la aplicación de un desviador consistió en un programa de ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante, siguiendo una trayectoria a succión y esfuerzo neto lateral constante. Se han, analizado muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas. El estado sobreconsolidado se indujo por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte; es decir, por un proceso mecánico de carga y descarga isótropa a succión constante; por un proceso hidráulico de humedecimiento y secado, bajo esfuerzo medio neto constante, con una deformación de colapso dominante; y, finalmente, por otro proceso hidráulico de secado y humedecimiento bajo condiciones libres de retracción y expansión, con una deformación de retracción dominante. Las muestras, normalmente consolidadas se estudiaron para el nivel máximo de esfuerzo medio neto experimentado por la muestra, y en trayectorias previas de colapso.

El desarrollo de la investigación se dividió básicamente en cuatro fases fundamentales:

- 4 Revisión del estado del conocimiento en suelos no saturados, incluyendo técnicas de ensayos, técnicas y sistemas de medida de volumen y medida de los parámetros del suelo
- 4 Puesta a punto de los equipos experimentales. Esta fase incluye las modificaciones o adaptaciones de nuevos aparatos, las calibraciones de los equipos existentes (célula triaxial con control de succión y mini-célula isótropa rígida con control de succión), y la definición de la instrumentación requerida, así como el desarrollo de nuevos equipos (célula edométrica con control de succión)
- 4 Desarrollo experimental. Estudio del comportamiento hidro-mecánico en suelos no saturados de tendencia colapsable mediante ensayos de laboratorio
- 4 Análisis e interpretación de los datos obtenidos en la fase anterior mediante un modelo de endurecimiento elastoplástico

1.3 Desarrollo del trabajo de investigación

Se dividió en siete capítulos que se resumen a continuación:

El capítulo 2 contiene el estado del conocimiento sobre el comportamiento de los suelos no saturados. Comienza con una reseña histórica y generalidades de la mecánica de los suelos no saturados, así como de los fenómenos que los caracterizan, en particular el hinchamiento y el colapso; continúa con el

comportamiento de deformación y con la rigidez y la resistencia al corte. Posteriormente, se incluye una revisión de las técnicas experimentales de medida y aplicación de la succión; se analiza el estado de esfuerzo al que se ven sometidos dichos suelos, y se presenta la teoría del modelo elastoplástico de Barcelona (Alonso, *et al*, 1990; Barcelona Basic Model: BBM).

En el capítulo 3 se describen los equipos de laboratorio desarrollados y utilizados, así como la instrumentación requerida y los diferentes métodos de calibración.

En cuarto hace alusión al suelo usado durante la investigación y las diferentes técnicas de preparación de las muestras en los diferentes ensayos. Se analizan las diferentes curvas de compactación del suelo, las curvas de compactación estática bajo condiciones isótropas (técnica de esfuerzo controlado), y las curvas de succión-grado de saturación obtenidas con la técnica psicrométrica. Se presentan resultados de los ensayos previos de comportamiento deformante (ensayos de colapso y de compresión isótropa), y la comparación del comportamiento de algunos resultados de los ensayos experimentales mediante el modelo de Alonso, *et al* (1990). Finalmente se presentan los resultados de resistencia al corte en condiciones saturadas.

En el quinto se describen los métodos y las trayectorias de esfuerzos dentro del programa de ensayos edométricos e isótropos con control de la succión, así como de compresión triaxial en muestras no saturadas.

El capítulo 6 corresponde a los resultados de los ensayos y los análisis de los datos obtenidos. Inicialmente; se realiza un estudio particular de la respuesta de cada ensayo edométrico con control de succión, y a continuación se hace un análisis de los ensayos isótropos con control de succión realizados tanto en una mini-célula isótropa como en un equipo triaxial. Posteriormente se presentan los resultados de los ensayos de compresión triaxial con succión controlada a velocidad de deformación constante. Asimismo, se indican los resultados de la implementación del modelo elastoplástico utilizando algunos resultados experimentales.

Finalmente en el capítulo 7 se incluyen las principales conclusiones derivadas de la investigación, y algunas líneas futuras de investigación abiertas.

Dentro de la fase experimental se llevó a cabo el siguiente programa de ensayos:

Ensayos de caracterización del suelo estudiado:

- ∉ Análisis del tamaño de partículas y límites de consistencia
- ∉ Análisis de difracción de rayos-X
- ∉ Análisis de microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM) en diferentes estructuras, obtenidas bajo un proceso de compactación isótropa y de ensayos de colapso
- ∉ Análisis de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) en muestras normalmente consolidadas
- ∉ Obtención de los parámetros de las curvas de compactación bajo diferentes valores de energía específica de compactación
- ∉ Ensayos de compactación estática, bajo esfuerzo isótropo controlado y obtención de los contornos de igual succión en el plano del ensayo de compactación, mediante la técnica psicrométrica

Ensayos del comportamiento de cambio de volumen, y resistencia al corte:

- ∄ Ensayos de colapso, bajo inundación a carga vertical constante en muestras con diferentes condiciones de estado inicial. Edómetro convencional
- ∄ Ensayos de colapso controlando la succión de la muestra hasta su total saturación, bajo carga vertical neta constante. Nueva célula edométrica con control de la succión matricial y total
- ∄ Ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas, fabricadas a diferentes condiciones de humedad y densidad. Célula triaxial convencional
- ∄ Ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas, fabricadas bajo diversas condiciones de estado inicial. Célula triaxial convencional

Ensayos edométricos con succión controlada en muestras con diferentes condiciones de estado inicial. Nueva célula edométrica con control de succión:

- ∄ Trayectorias de carga–descarga a succión constante ($u_a-u_w = 0.3$ MPa y 0.05 MPa)
- ∄ Trayectorias de humedecimiento–secado, bajo esfuerzo vertical neto constante ($\omega_v-u_a = 0.6$ MPa y 0.3 MPa)
- ∄ Trayectorias de humedecimiento a esfuerzo vertical neto constante ($\omega_v-u_a = 0.6$ MPa y 0.3 MPa)

Ensayos de carga isótropa con succión controlada en diferentes muestras, bajo condiciones iniciales específicas. Mini-célula isótropa rígida con control de succión:

- ∄ Trayectorias de humedecimiento–secado a esfuerzo medio neto constante ($\omega_m-u_a = 0.6$ MPa)
- ∄ Trayectorias de carga–descarga, bajo succión constante ($u_a-u_w = 0.2$ MPa)
- ∄ Trayectorias de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante ($\omega_m-u_a = 0.2$ MPa y 0.3 MPa)

Ensayos de carga isótropa, y cambio de succión en la célula triaxial con control de succión:

- ∄ Trayectorias de carga–descarga a succión constante ($u_a-u_w = 0.15$ MPa y 0.02 MPa)
- ∄ Trayectorias de mojado–secado a esfuerzo isótropo medio neto constante ($\omega_m-u_a = 0.6$ MPa)
- ∄ Trayectorias de humedecimiento a esfuerzo isótropo medio neto constante ($\omega_m-u_a = 0.6$ MPa)

Ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante, siguiendo una trayectoria a succión y esfuerzo radial neto constante. Célula triaxial con control de succión:

- ∄ Ensayos en muestras normalmente consolidadas. Estos ensayos fueron estudiados:
 - 4 Al nivel máximo de esfuerzo medio neto que haya experimentado la muestra
 - 4 Después de un previo fenómeno de colapso
- ∄ Ensayos en muestras sobreconsolidadas; el estado fue inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte:
 - 4 Proceso mecánico de carga–descarga isótropa a succión constante
 - 4 Proceso hidráulico en trayectorias de humedecimiento–secado a esfuerzo medio neto constante ($\omega_m-u_a = 0.6$ MPa), con una deformación de colapso dominante
 - 4 Elevado incremento–disminución de la succión total, bajo condiciones libres de expansión y retracción con una retracción dominante

CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO DE SUELOS NO SATURADOS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 Introducción

Durante muchos años, los estudios de la mecánica de suelos pusieron especial énfasis en los suelos saturados, quedando los suelos no saturados relegados a un segundo plano, a pesar de que extensas regiones de la Tierra están cubiertas por ellos. Dudley (1970) comentó que ya Terzaghi había llamado la atención sobre la tendencia de los suelos no saturados a experimentar cambios de volumen cuando se inundaban. Hoy en día se tiene un conocimiento muy bueno del comportamiento de los suelos saturados, existiendo modelos mecánicos que permiten explicar de forma conjunta todos los comportamientos de resistencia, deformación volumétrica y al corte. Sin embargo, existe una mayor escasez de información y conocimiento en el campo de los suelos parcialmente saturados. Es posible que este hecho sea debido a la gran ocurrencia de suelos saturados sedimentarios en países con clima templado. También por el descubrimiento de la ley de presiones efectivas de Terzaghi, que permite explicar de forma sencilla el comportamiento de los suelos saturados. Sin embargo existen muchas condiciones en las que no se alcanza la saturación. Es más, los suelos parcialmente saturados son los más frecuentes en muchas regiones áridas y semiáridas. Gran parte de los comportamientos que experimenta un suelo parcialmente saturado está relacionada con la deformación volumétrica. Por otra parte, hay gran diversidad de suelos parcialmente saturados, muchos de ellos con características o comportamientos particulares, como arcillas expansivas muy plásticas (con expansión y retracción en ciclos de mojado y secado); depósitos aluviales (suelos colapsables cuando presentan una estructura abierta); coluviales y eólicos; suelos compactados, etc. Muchos de estos problemas se han tratado de resolver y estudiar por separado como un problema especial, tal y como señalan Alonso *et al.* (1987). No obstante, los mismos autores proponen un estudio global de dichos suelos desde la perspectiva del comportamiento controlado por la succión, como nexo de unión entre los suelos parcialmente saturados.

2.1.1 Reseña histórica de la mecánica de los suelos no saturados

La evolución de la mecánica de los suelos no saturados puede dividirse en tres periodos. En el primer periodo, antes de 1965, muchas de las investigaciones llevadas a cabo en los suelos no saturados fueron para investigar la validez del concepto de los esfuerzos efectivos para los suelos no saturados (por ejemplo, Bishop, 1959, y Aitchison, 1960). Durante este periodo el concepto de los esfuerzos efectivos se modificó con la finalidad de analizar el comportamiento de los suelos no saturados.

En el segundo periodo, de 1965 a 1987, buena parte de las investigaciones fue con la finalidad de investigar la posibilidad de usar dos variables de estado de esfuerzo en lugar de una (por ejemplo, Matyas y Radhakrishna, 1968, y Fredlund, 1979). El “esfuerzo neto” (esfuerzo total, menos presión de aire de poros), y “succión” (presión de aire de poros, menos presión de agua de poros) se trataron como las dos variables de estado de esfuerzo. Durante este periodo se desarrollaron estructuras independientes para modelar comportamientos en el cambio de volumen y de corte en los suelos no saturados en términos de las dos variables de estado de esfuerzo. Sin embargo, el comportamiento del cambio de volumen y de corte se trató por separado.

En el tercer periodo, desde 1987, varios investigadores han trabajado en el comportamiento de los suelos no saturados en términos del concepto del estado crítico, y trataron de investigar el límite elástico de los suelos no saturados cuando el suelo es sometido a un ciclo de carga y descarga (Alonso, *et al* 1990). Hasta entonces, el comportamiento del cambio de volumen y de corte de los suelos no saturados se había tratado separadamente. En investigaciones recientes se comienza a enlazar el comportamiento del cambio de volumen y la resistencia al corte de los suelos no saturados desarrollándose modelos elastoplásticos. Asimismo, ha surgido una evolución en los aparatos de laboratorio que permite medir en forma más precisa tales comportamientos.

2.2 El suelo no saturado. Generalidades

2.2.1 Origen

Teniendo en cuenta su origen, los suelos parcialmente saturados pueden ser naturales o artificiales. Respecto a los primeros se ha descrito en la bibliografía una gran variedad de ejemplos tanto en suelos sedimentarios (eólicos, aluviales, coluviales, etc), como en suelos residuales lateríticos y saprolíticos.

Gran parte de los suelos sedimentario se han depositado en ambientes acuosos, quedando inicialmente saturados y posteriormente desecados debido a las circunstancias ambientales. Estos suelos abundan en lugares de clima árido y semi-árido, en que las estaciones son muy marcadas con periodos secos prolongados. Según diversos autores, estos lugares ocupan cerca del 30 % de la superficie de la Tierra. Respecto a los suelos residuales, su formación se asocia a los agentes de meteorización y el tipo de roca matriz. Los suelos tropicales lateríticos y saprolíticos, frecuentemente se encuentran en estado no saturado, debido a sus características de alta permeabilidad y las condiciones climáticas en las cuales se encuentran (Vaughan, 1985). Estos suelos son originados por la intensa y profunda descomposición de la roca matriz, bajo condiciones climáticas y biológicas que prevalecen en los trópicos. Por otra parte, dentro de los suelos artificiales se encuentran los suelos compactados, extensamente utilizados en obras de tierra (presas, terraplenes, etc), que debido a su naturaleza son suelos no saturados. Según Barden (1965), es razonable aceptar ciertas similitudes de comportamiento entre los suelos compactados y los suelos naturales desecados.

Los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo no saturado se relacionan con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser tanto positivas, en cuyo caso se produce un colapso, como negativas, en cuyo caso se produce una expansión. Según Aitchison (1973), tanto el colapso como la expansión pueden ser considerados como procesos de inestabilidad estructural, debido a que inducen discontinuidades en el comportamiento deformacional del suelo al variar las condiciones ambientales (ejemplo, cambios de humedad), sin modificación del estado de esfuerzo exterior. Teniendo en cuenta la importancia de estos suelos para comprender el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, se presentan a continuación algunos aspectos referentes a su origen. Respecto a los suelos identificados con estructura potencialmente colapsable, éstos tienen origen bastante variable. Aunque los más extendidos son los de origen eólico (loes y arena eólica) se han observado colapsos en suelos aluviales, coluviales, residuales o en rellenos compactados (Dudley, 1970). La sensibilidad al colapso es graduada según el tipo de depósito, de tal forma que los suelos de origen eólico son, en general más propensos al colapso que los aluviales. Sin embargo, Aitchison (1973) indica que dependiendo del lugar pueden existir importantes variaciones. De forma general se observa que el origen de un suelo es de poca ayuda para conocer su potencialidad en colapsar. Aitchison (1973) indica lo inadecuado en definir un suelo como colapsable, sin que antes se haya definido una estructura que a su vez depende de la porosimetría, del grado de saturación y del estado de esfuerzo a que esté sometido.

En cuanto a los suelos potencialmente expansivos, hay que relacionar su origen a la presencia de partículas arcillosas que puedan provocar esta expansión. Habitualmente se consideran tres minerales arcillosos: montmorillonita, illita y caolinita; que por su abundancia respecto a otros se les considera como básicos para efecto de estudiar este fenómeno. Según Schreiner (1987), la fuente de estos minerales es una amplia gama de rocas ígneas básicas incluyendo rocas volcánicas y lavas en las que las más frecuentes son los basaltos, si bien en algún caso ha sido el granito. La montmorillonita necesita un medio alcalino como factor imprescindible, y se genera habitualmente en zonas áridas con poco drenaje y en consecuencia con alta concentración de cationes y minerales. La caolinita se produce con pH más bajo, y en las zonas más drenadas y con menores concentraciones de cationes. Por esta razón la montmorillonita abunda en valles y zonas deprimidas, y la caolinita en lugares con mayores pendientes. La illita, por su parte, precisa para su formación un pH ligeramente alcalino.

2.2.2 Fases componentes de un suelo no saturado

El suelo parcialmente saturado es un sistema trifásico compuesto por sólidos, líquidos y gases. Las relaciones entre estas fases y los componentes del suelo, según Yoshimi y Osterberg (1963), están presentadas en la Fig. 2.1 de forma resumida. Contrariamente a lo ya expuesto, Fredlund y Morgenstern (1977) han propuesto una cuarta fase, considerando a la interfase entre el aire libre y el agua libre como una fase independiente. Aducen que esta interfase, formada por una película de escasas moléculas de espesor, tiene propiedades distintas de las del agua y el aire a las que separa. En su análisis de esfuerzo, dichos autores consideran que dos de las fases se equilibran bajo las presiones aplicadas (partículas sólidas y “membrana contráctil”), y las otras dos fases fluyen bajo las presiones aplicadas (aire y agua). Por otro lado, en las relaciones peso – volumen se considera el suelo como un sistema trifásico, incluyendo el peso de la membrana como parte del peso del agua y no considerando su volumen. En esta investigación se consideró al suelo como un sistema trifásico compuesto por un esqueleto sólido, con poros rellenos de agua y aire, sin tener en cuenta la influencia de la membrana “contráctil” de forma independiente. El conocimiento de las interacciones entre las tres fases del sistema constituye el punto básico para entender el comportamiento del suelo no saturado. A continuación se comentará brevemente algunos aspectos básicos de cada una de las fases constitutivas.

Fase sólida

Está integrada básicamente por partículas sólidas de distintos tamaños. Las propiedades más importantes de dichas partículas son:

- ∉ Tamaño
 - * Fracción gruesa
 - * Fracción fina
- ∉ Forma
- ∉ Textura
- ∉ Composición química
 - * Cargas eléctricas
 - * Capacidad de cambio catiónico

Estas propiedades son, en gran medida, responsables de muchos de los comportamientos característicos de un suelo. Las partículas se disponen formando arreglos geométricos, conocidos como estructura del

suelo. Ésta es determinante en la respuesta del suelo especialmente en los no saturados, ya que influyen en el estado de esfuerzo que se desarrolla en los contactos entre partículas, el aire y el agua, y controla la componente capilar de la succión (Alonso, *et al*, 1987).

Fase líquida

Se compone fundamentalmente del agua y de las sales disueltas en ella. De una forma clásica ha sido clasificada en tres tipos:

- ∄ Agua adsorbida en la partícula, o como parte de la capa doble difusa, que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas
- ∄ Agua capilar, que permanece en el suelo por acción de las fuerzas capilares, y puede moverse por la acción de éstas
- ∄ Agua gravitacional, aquella que puede perder el suelo en condiciones de drenaje libre por gravedad

Desde el punto de vista hidrodinámico el agua capilar y la gravitacional forman una sola unidad, que puede denominarse agua libre.

Fase gaseosa

Está formada básicamente por aire y vapor de agua. Según varios autores, la forma en que se encuentra el aire en el suelo, se relaciona con la humedad o el grado de saturación del mismo. Hilf (1956), citado por Gili (1988), considera que las burbujas sólo pueden existir si el agua que ocupa los poros del suelo está saturada de aire. Según Vaughan (1985), el aire presente en el suelo tiene tendencia a agruparse ocupando completamente determinados poros en lugar de permanecer en forma de burbujas aisladas. El aire que se disuelve es por la Ley de Henry y se difunde a los poros cerrados con menor presión, por lo que cuando el sistema alcanza el equilibrio todas las bolsas de aire quedan con la misma presión. Cuando el grado de saturación del suelo es bajo, el aire puede ocupar sus canalículos que pueden estar comunicados entre sí y con el exterior. Desde un punto de vista geotécnico el aire se considera compresible, en contraposición con el agua que siempre se la califica de incompresible. Aunque el aire no sea un gas perfecto, se le atribuye un comportamiento que sigue la Ley de los Gases Perfectos para el intervalo de presiones y temperaturas usuales en el suelo.

2.2.3 Clasificación de los suelos no saturados

La estructura de un suelo no saturado depende del proceso por el cual el suelo ha llegado a ser no saturado (por ejemplo, secado de un suelo natural o compactación de rellenos). La estructura tiene una influencia considerable en el comportamiento del suelo no saturado. Por esta razón, los suelos no saturados, generados por diferentes procesos tienden a presentar diferentes formas de comportamiento mecánico. En suelos formados por un proceso dado, la estructura suele variar considerablemente, en particular en rellenos de arcillas compactadas. La estructura de un relleno de arcilla compactada no saturada cambia drásticamente con el método de compactación, el grado de compactación, y el contenido de agua.

Wroth y Houlsby (1985) propusieron tres tipos diferentes de suelos no saturados, tomando como base la continuidad del fluido de fases.

1. *Fase de aire discontinua, y la fase de agua continua* (Fig. 2.2a). Este tipo de estructura se encuentra en los suelos no saturados que tienen un alto grado de saturación. En estos suelos el aire se

encuentra en forma de burbujas discretas. Situación que ocurre probablemente en una zona de transición estrecha en suelos naturales, sobre la zona saturada y bajo una zona con bajo grado de saturación.

2. *Fases continuas de aire y agua* (Fig. 2.2b). Este tipo de suelo no saturado se encuentra en suelos con un grado intermedio de saturación. El intervalo de grado de saturación se presenta: a) en una zona de transición en un depósito de suelo natural; b) en rellenos compactados de granos finos (limo y arcillas).
3. *Fase de aire continua, y fase de agua discontinua* (Fig. 2.2c). Este tipo de suelo no saturado se encuentra en suelos no saturados con bajos grados de saturación. Esto se presenta: a) en suelos naturales cercanos a la superficie, y b) en algunos rellenos compactados, por ejemplo, escolleras y pedraplenes.

La presión de aire de poros en suelos no saturados es siempre mayor que la presión de agua de poros, debido a la curvatura de la interfase aire-agua. En suelos no saturados en bases de tierra que contienen una fase de aire continua (puntos 2 y 3), la presión de aire de poros será cero (igual a la presión atmosférica), debido a que la fase de aire continua está abierta a la atmósfera, y la presión de agua de poros será negativa.

La investigación que se describe se enfocó particularmente sobre los suelos no saturados encontrados en suelos compactados estáticamente, bajo condiciones isotropas. Este proceso particular de compactación deja al suelo en un grado de saturación máxima de 70 %, resultando en un suelo que presenta las características del punto 2.

2.2.4 Estructura de los suelos

En este apartado serán tratados algunos aspectos de la estructura del suelo, principalmente aquellos que afectan más significativamente a sus propiedades hidro-mecánicas. Su conocimiento permite una interpretación cualitativa del comportamiento del suelo. El término estructura será referido aquí a la distribución y orientación del conjunto de las partículas sólidas del suelo.

La estructura interna que presentan los suelos es un aspecto de gran importancia en el comportamiento mecánico de éstos. Así, por ejemplo, bajo las mismas condiciones de carga, para un suelo con una estructura abierta se produce un colapso durante el mojado del suelo, sin embargo, en el mismo suelo y en condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir un hinchamiento al mojarlo. Inicialmente se trató de explicar el comportamiento de las arcillas considerando que tenían una estructura floculada, o una dispersa, aplicando la teoría de la capa doble difusa. No obstante, los conceptos se desarrollaron para dispersiones coloidales, y no pueden aplicarse más que en casos muy particulares, por ejemplo, en arcillas marinas. La teoría de la capa doble difusa trata de explicar las fuerzas de los contactos en función del tipo de estructura floculada (de tipo abierta, con numerosos contactos cara-borde), o dispersa. Con base en dicha teoría, las caras de las partículas de arcilla están cargadas negativamente, mientras que los bordes, positiva y negativamente; de este modo se generan los contactos cara-borde, o borde-borde.

En la actualidad se considera la estructura interna del suelo, de forma simplificada, teniendo en cuenta tres tipos de elementos (Alonso, *et al*, 1987): partículas elementales, agregados de partículas, y poros. A partir de estos elementos se pueden establecer tres estructuras fundamentales (Fig. 2.3) que

simplifican el conjunto de todas las estructuras posibles. Cuando las partículas elementales se distribuyen de manera homogénea, se considera una estructura de tipo matricial, con granos de arena rodeados de partículas arcillosas elementales creando una matriz. A veces las partículas elementales se agrupan como si fueran un grano de tamaño mayor. En este caso se dice que hay una microestructura de agregados. Finalmente, puede considerarse una estructura de granos de arena con conectores de arcilla entre los granos, o contactos directos, sin partículas de arcilla.

Generalmente los suelos compactados del lado húmedo del óptimo de compactación, y los suelos expansivos corresponden a una microestructura de tipo predominantemente matricial. Mientras que los suelos compactados del lado seco del óptimo, o que tienen tendencia a colapsar, suelen presentar microestructura de agregados, o con conectores de arcilla. Cuando se carga un suelo con una microestructura de agregados, los contactos entre agregados o entre granos de arena, y agregados se rompen de modo que los agregados pasan a ocupar el vacío de los poros, y el suelo colapsa irreversiblemente. Este comportamiento se condiciona por la succión matricial que actúa de dos modos: la componente capilar, asociada al agua entre agregados, aumenta la rigidez de la estructura cuando la succión es elevada; mientras que la componente de adsorción, mantienen en las partículas de arcilla, una baja compresibilidad. De un modo similar, si mojamos el mismo suelo la disminución de la succión provoca una disminución de la resistencia de los contactos entre agregados, y la estructura se colapsa irreversiblemente. Esto sucede a pesar de que los agregados puedan experimentar un aumento de volumen debido a la captación de agua en las partículas de arcilla. Pero este aumento de volumen en materiales no expansivos, es menor que la disminución provocada por el colapso general de la estructura, con desaparición de gran cantidad de los macroporos. En algunos casos es posible transformar la estructura de agregados, en una de tipo matricial.

Los suelos de estructura matricial cuando se mojan, se hinchan debido al aumento de volumen de las partículas de arcilla que constituyen la matriz. Del mismo modo, cuando se les somete a un aumento de succión reducen su volumen. Este último fenómeno no se produce en forma tan marcada en suelos con estructura de agregados, ya que al aumentar la succión, también se incrementa la resistencia de los contactos entre agregados, pero la estructura no retrae, y la variación de volumen global es pequeña.

La estructura de los suelos se ha estudiado por medio de microscopio de barrido electrónico (SEM), lo que permite una referencia visual. Además, actualmente los microscopios de tipo ambiental (ESEM) permiten controlar la humedad de las muestras, de modo que es posible un estudio más detallado de la microestructura. Por otra parte, un análisis de porosimetría permite detectar distribuciones de poros bimodales, en el caso de estructuras de agregados (Fig. 2.3b), con la existencia de poros inter-agregados. Mediante la distribución de los poros también es factible observar que bajo cargas de compactación mayor, los macroporos disminuyen de tamaño, pero no sucede igual con los microporos.

2.2.5 Succión en suelos no saturados

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield, (1935) para representar la “deficiencia de presión” en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no saturados), que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba a la presión atmosférica. El término succión o potencial de agua designa la integrante del estado de esfuerzo para aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado de esfuerzo y

entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado. Para Blight (1965), el efecto de la succión en un suelo no saturado equivale al de una presión exterior aplicada.

La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros, se define como succión matricial. El valor de ésta depende del esfuerzo superficial y el radio de curvatura del menisco. Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños donde el radio de curvatura del menisco se reduce; de esta manera, la succión matricial se incrementa. Debido a los poros pequeños, se desarrollan succiones matriciales mayores en suelos arcillosos, más que en los suelos granulares.

El flujo de agua a través de los suelos no saturados se controla por el gradiente del potencial de agua total, el que puede expresarse como la suma de tres componentes:

- a) *Potencial gravitacional*, causado por la elevación del agua del suelo con respecto a un nivel de referencia
- b) *Capilar o potencial matricial*, causado por efectos del esfuerzo de superficie
- c) *Potencial osmótico*, causado por la concentración de iones disueltos en el agua del suelo

Para un suelo no saturado con aire en los poros a presión atmosférica, el potencial matricial está dado por la succión matricial, definida anteriormente, multiplicado por la unidad de peso del agua (con un apropiado cambio de signo). Por analogía, el potencial osmótico, dividido por la unidad del peso del agua se llama “succión osmótica” (nuevamente con un cambio de signo). La suma de la succión matricial y la succión osmótica se define como la succión total.

Evidencias experimentales sugieren que la resistencia al corte y el comportamiento del cambio de volumen de suelos no saturados son más dependientes de la succión matricial que de la succión total (Alonso, *et al*, 1987). De esta manera, el comportamiento de esfuerzo–deformación depende de la succión matricial mientras que el flujo de agua depende del gradiente de la succión total (más efectos gravitacionales).

2.2.6 Comportamiento deformacional de los suelos no saturados

2.2.6.1 Fenómeno de colapso

En los suelos parcialmente saturados con una estructura abierta, al aumentar el grado de saturación por cambios ambientales o de otro tipo, pueden producir reducciones volumétricas irreversibles sin que varíen las sollicitaciones externas del suelo; es decir, sin aumento de la carga aplicada; este fenómeno se conoce con el nombre de colapso.

El colapso es uno de los fenómenos más característicos de los suelos parcialmente saturados y ha sido estudiado por numerosos autores, entre los que se pueden citar Dudley (1970); Jiménez Salas, *et al*, (1973); Maswoswe (1985), entre otros, que exponen las características que debe tener un suelo para que en él ocurra un colapso:

- 4 Estructura abierta, no saturada, tipo panal de abeja, capaz de reducir significativamente su volumen a expensas de una disminución del volumen de poros

- 4 Un estado exterior de carga suficientemente grande como para generar una condición metaestable para la succión aplicada
- 4 La existencia de enlaces entre partículas, que se debiliten en presencia del agua

Según Jiménez Salas y Justo (1975) algunos materiales arcillosos de baja y mediana plasticidad presentan un comportamiento combinado de expansión y colapso cuando se los satura. El cambio neto de volumen que experimenta un suelo arcilloso cuando se pone en contacto con el agua es la suma de dos términos; por un lado, la expansión que se produce al relajar los esfuerzos netos entre partículas y por otro el colapso que ocurre al fallar las uniones entre grandes partículas. La deformación que se atribuye al hinchamiento puede ser elástica; no así la que corresponde al colapso. Esta última implica un reordenamiento de la estructura y es irreversible.

Un mismo suelo suele sufrir expansión o colapso, o ningún cambio de volumen de acuerdo con la densidad seca, la humedad, y la presión aplicada en el momento en el que se inunda, como señalan Jennings y Kenight (1975); según estos autores hay un cruce en las curvas obtenidas en los ensayos realizados en un doble edómetro (Fig. 2.4), que separa la zona de hinchamientos probables, de la zona de colapsos probables.

2.2.6.2 Mecanismo de colapso

Un suelo con tendencia al colapso, en general es estable mientras el grado de saturación es inferior a cierto límite; a partir del cual la llegada del agua puede debilitar suficientemente los enlaces existentes como para que se produzcan deslizamientos tangenciales en los contactos entre partículas. Los enlaces entre partículas del suelo pueden ser de varios tipos:

- 4 Enlace capilar que se presenta fundamentalmente en de limos y arenas. Los meniscos que se forman en la interfase (aire-agua-partículas sólidas), generan fuerzas normales que aumentan los esfuerzos entre dichas partículas, rigidizando el conjunto. En el caso de las arcillas este fenómeno no es tan claro a nivel de partículas aunque es probable que ocurra a nivel de agrupaciones más grandes de las mismas.
En cualquier caso si el grado de saturación crece por aumento de la humedad o por reducción del índice de vacíos, estos enlaces desaparecen con lo que el conjunto se debilita pudiendo llegar al colapso si la presión exterior aplicada es suficientemente grande.
- 4 Enlaces con puentes de partículas arcillosas que unen entre sí partículas mayores de limo, arena o arcilla. Las partículas de arcilla que forman los puentes pueden ser de origen diferente, pueden haber sido transportadas por el agua, o estar allí desde la formación del suelo, o ser autogénicas por acción del agua intersticial sobre los feldespatos existentes. Estos puentes de arcillas pueden desaparecer o cambiar su estructura con la llegada del agua.
- 4 Enlaces por cementación formados por el arrastre de sales, generalmente calcáreas, que se precipitan en los huecos que dejan las partículas de arena. Si posteriormente estos suelos son sometidos a un lavado permanente, las sales pueden disolverse desapareciendo los ensalces y causando así una reordenación de la estructura.

En todos los enlaces descritos la llegada del agua causa el mismo efecto: reducción de la resistencia al corte en los contactos entre partículas sólidas. Si la resistencia cae por debajo del esfuerzo impuesto por las cargas exteriores aplicadas se produce el colapso que conduce a una nueva estructura capaz de

resistir el nuevo estado de esfuerzos. Una vez que ha ocurrido el colapso la nueva estructura del suelo es estable, y es incapaz de sufrir nuevos colapso a menos que cambie el estado de esfuerzos existente y/o el grado de saturación. Los Ensayos de Booth (1975); Yudhbir (1982) y Maswoswe (1985) muestran que el colapso alcanza un máximo a partir del cual disminuye. El tipo de suelo y de estructura que se tiene en el suelo condiciona la magnitud del máximo de colapso y la presión para la que se produce (Fig. 2.5)

2.2.6.3 Fenómeno de expansión

Determinados suelos (expansivos) sufren fenómenos de hinchamiento de magnitud considerable al aumentar su humedad. Aunque en general expansión es cualquier disminución de deformación volumétrica, como por ejemplo la producida al reducir los esfuerzos esféricos, en este caso se refiere expresamente al aumento de volumen provocado en el proceso de humedecimiento manteniendo constante el estado de esfuerzo exterior.

El proceso de expansión se produce cuando un suelo no saturado se humedece al adsorber agua entre sus partículas, aumentando de volumen. Este incremento de volumen tiene una componente debida a la relajación de los esfuerzos intergranulares al crecer el grado de saturación. De hecho se pueden cambiar estos dos fenómenos, absorción de agua y relajación de esfuerzos, con un posible colapso, dependiendo de la estructura del suelo (densidad seca, presión exterior, etc.). En general, el hinchamiento se asocia a terrenos arcillosos plásticos con densidades secas altas y presiones exteriores bajas, contrariamente a lo habitual en procesos de colapso.

Los suelos no saturados que contienen minerales arcillosos como la illita, la caolinita y la montmorillonita tienen tendencia a hinchar cuando se ponen en contacto con el agua. Lambe y Whitman (1959) se han referido exhaustivamente a estos minerales, y consideran que el potencial de expansión de los minerales arcillosos expansivos depende de los siguientes factores: estructura de los cristales; estructura del grupo de cristales y capacidad de intercambio catiónico

Los mecanismos que producen la expansión se relacionan con las propiedades y características de las partículas arcillosas. Son fundamentales las cargas eléctricas netas en estas partículas provocadas, sobre todo, por sustituciones isomorfas, y la consecuente formación de la capa doble difusa conteniendo cationes y moléculas de agua.

Delgado (1986) resume en tres, los mecanismos microestructurales fundamentales que producen la expansión:

- 4 *Hidratación de las partículas de arcilla*: las partículas de arcilla, con cargas negativas, se rodean de moléculas de agua que a su vez atraen a otras moléculas de agua al quedar desbalanceada su carga eléctrica. El equilibrio eléctrico puede satisfacerse por cationes, formándose así cadenas de partículas-agua-cación-agua-partícula. En resumen, la partícula de arcilla se hidrata y aumenta de volumen.
- 4 *Hidratación de cationes*: los cationes adsorbidos en la capa doble difusa se rodean de moléculas de agua, produciendo el consiguiente aumento de volumen.
- 4 *Repulsión osmótica*: la concentración de cationes en la capa doble difusa decrece al alejarse de la partícula arcillosa, lo cual puede provocar una migración de las moléculas de agua hacia el interior

por ósmosis si se pone en contacto con agua pura, o con agua con una concentración más baja de cationes. El resultado es un aumento de volumen.

2.2.6.4 Factores que afectan la expansión

El proceso de expansión de un terreno se afecta por una serie de factores que condicionan su evolución y magnitud. Gromko (1974) los resume en los siguientes:

- 4 *Tipo de minerales, y cantidad de los mismos*: cuanto más expansivos sean los minerales presentes en el suelo, mayor será el hinchamiento que se producirá cuando el suelo se inunde
- 4 *Densidad*: para el mismo suelo con la misma humedad inicial, la expansión será mayor cuanto más grande sea la densidad seca del mismo. Este fenómeno se puede observar en los de Cox (1978) sobre una limonita con un 27 % de arcilla que fue sometida a diversas presiones, e inundada posteriormente (Fig. 2.6, 2.7)
- 4 *Estado de esfuerzos*: la magnitud de la expansión es tanto menor cuanto mayor es la presión aplicada al suelo pudiendo llegar a anularlo por completo. El efecto de la presión se observa en la Fig. 2.6, obtenida de Cox (1978)
- 4 *Estructura del suelo*: los suelos que han experimentado cementaciones tienen menor tendencia a hinchar. Seed y Chan (1959) señalan que las estructuras floculadas tienen mayor tendencia a hinchar que las dispersas, en cambio la retracción es mucho menor para las primeras.
- 4 *Tiempo*: dado que los suelos arcillosos expansivos son muy poco permeables, el proceso de absorción de agua de los mismos puede durar semanas, incluso años dependiendo de las condiciones de infiltración y del espesor del estrato (Balmaceda, 1991).
- 4 *Fluidos intersticiales*: la presencia de sales disueltas en el agua que ocupan los poros del suelo influye en los fenómenos de formación de la capa doble. Una elevada concentración de sales y un pH alto favorecen la disociación de éstas, por tanto, aumenta la cantidad de cationes presentes en el agua libre. Esto hace que se produzca una menor adsorción de cationes y, que el hinchamiento sea menor.
- 4 *Humedad*: la humedad del suelo influye también en la magnitud del hinchamiento. Cuanto menor es la humedad mayor es la expansividad potencial por cuanto el suelo es capaz de adsorber más cantidad de agua.

De acuerdo con los factores indicados, en un proceso de compactación la expansividad del suelo estará directamente relacionada con el método utilizado, con la energía de compactación o la humedad inicial. En las Fig. 2.8 y 2.9 procedentes de Holtz (1959), y citadas por Josa (1988) puede observarse esta relación.

2.2.6.5 Comportamiento volumétrico

La deformación de los suelos parcialmente saturados ha sido largamente estudiada, principalmente en los análisis del comportamiento de los suelos potencialmente colapsables y expansivos.

Algunos suelos pueden presentar un comportamiento expansivo o colapsable, o hasta combinar los dos fenómenos en un mismo proceso de humedecimiento si los esfuerzos exteriores son suficientemente bajas o altas. Las deformaciones consideradas son globales del suelo, que concluyen tanto en las

componentes recuperables como irre recuperables. Alonso, *et al* (1987) analiza las deformaciones volumétricas de los suelos colapsables y expansivos.

El comportamiento esfuerzo-deformación se ha analizado considerando el espacio de esfuerzos $p : s$, donde p es el esfuerzo neto y s la succión. Existe gran cantidad de ensayos publicados, con diferentes trayectorias de esfuerzos en dicho plano. De ellos se pueden extraer los siguientes resultados:

- 1) El aumento de la succión contribuye a un incremento de la rigidez de los suelos, de modo que parece que la carga de preconsolidación aparente aumenta con la succión (Alonso, *et al*, 1987). Por otro lado, este crecimiento de la succión puede producir deformaciones plásticas irre recuperables, principalmente en suelos arcillosos (Josa, 1988). Sin embargo, el aumento de la rigidez no puede ser indefinido y como se observa en Escario y Sáez (1987) en resultados experimentales, la relación entre la rigidez y la succión es no lineal, llegando a un valor máximo de rigidez para succiones que superen cierto valor.
- 2) La carga aplicada controla en gran medida, la expansión de los suelos cuando se someten a una disminución en la succión. Cuanto mayor es la carga aplicada, menor es la expansión. En los suelos expansivos, los procesos cíclicos de humedecimiento y secado provocan una expansión irre recuperable (plástica) en el primer humedecimiento, y a partir de él, el comportamiento es prácticamente elástico (Yuk, 1994).
- 3) La mayoría de los suelos se pueden hinchar o colapsar dependiendo de la carga aplicada cuando se disminuye la succión. Para cargas elevadas el suelo se colapsa, pero hincha con cargas bajas. Sin embargo, no es sencillo determinar el valor de la carga a partir del cual se hincha o colapsa, dado que este comportamiento depende del valor de la succión. Es decir, un suelo que inicialmente se hincha al disminuir la succión, puede llegar a un valor de la succión para el cual empiece a colapsar, aunque el resultado global sea de una expansión (Fig. 2.10). En los suelos compactados, estos fenómenos se relacionan con el hecho de que aquellos que se compactan del lado seco del óptimo presentan una estructura de agregados. Inicialmente se produce un hinchamiento por el humedecimiento, pero la resistencia de los contactos entre los agregados disminuye con la succión de modo que al llegar a un valor crítico (que depende de la carga de forma inversa) la estructura colapsa.
- 4) Los suelos con una estructura abierta experimentan un colapso cuando se disminuye la succión. A medida que se incrementa la carga aplicada, el colapso producido al saturar un suelo, aumenta hasta llegar a una valor máximo, después del cual el colapso disminuye (Fig. 2.11). El valor de la carga para la cual se produce el colapso máximo depende, entre otros factores, del tipo de suelo, la humedad inicial y la densidad seca inicial.
- 5) Al cargar el suelo progresivamente se pueden producir deformaciones irreversibles, si se supera el valor de la presión de preconsolidación, de un modo similar a los suelos saturados. Sin embargo este valor aumenta con la succión, como se comentó en el primer punto.
- 6) El valor del hinchamiento alcanzado depende de la trayectoria de esfuerzos que se ha seguido en el plano $p : s$, sobretodo cuando las trayectorias incluyen incrementos en la succión.

Resultados de este tipo pueden encontrarse en Maswoswe, (1985) (ensayos en una arcilla arenosa en muestras compactadas estáticamente), y Justo, Delgado y Ruiz (1984) (ensayos en arcillas expansivas de muestras compactadas). En ensayos edométricos con control de succión han mostrado, que un comportamiento volumétrico inverso podría ocurrir durante el proceso de humedecimiento. De hecho, microestructuras potencialmente colapsables sujetas a una reducción de la succión de un valor inicial

relativamente alto, primeramente experimentan un hinchamiento y después una deformación de compresión (Escario y Sáez, 1973; Cox, 1978; Alonso, *et al*, 1987).

En el estudio del comportamiento deformante de los suelos parcialmente saturados existen varios planteamientos que consideran el suelo como un material isótropo y elástico. Fredlund y Morgenstern (1976), refiriéndose a la fase sólida utilizan distintos módulos elásticos respecto a los esfuerzos y a la succión. Justo y Saettersdal (1982) citado por Yuk (1994), donde presentan una revisión de los métodos elásticos y un análisis de los suelos expansivos y colapsables. Richards (1984) analizando el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos expansivos propone un modelo que incorpora el comportamiento no lineal, en función del esfuerzo aplicado y de la succión, histéresis en el comportamiento esfuerzo deformación y los esfuerzos internos de tracción y corte.

2.2.7 Rigidez al corte de los suelos no saturados

La resistencia al corte de los suelos parcialmente saturados se ha apoyado en la ley de esfuerzos efectivos, incluyendo la succión de forma explícita (Bishop, *et al*, 1960) y también incorporando las fuerzas eléctricas intergranulares (Lambe, 1960). La resistencia al corte crece con el incremento de la succión que corresponde a un aumento en los esfuerzos efectivos.

La resistencia de corte del suelo saturado es la resistencia mínima del suelo saturado, o sea la condición más desfavorable del suelo con la saturación completa. Teniendo en cuenta los grados de saturación a que el suelo puede estar sometido en la naturaleza, el conocimiento de la variación de la resistencia asociado a los cambios del contenido de agua (o grado de saturación), conducirán al conocimiento más completo de su comportamiento. Los principales factores que afectan la resistencia al corte son la densidad seca (o el índice de poros), el contenido de humedad y el tipo de estructura (Lambe y Whitman, 1959; Seed y Chan, (1959).

Análogamente al caso de la deformación volumétrica, diferentes autores comprueban que la resistencia al corte aumenta con la succión partiendo del estado saturado. Brull (1980) encontró una relación lineal entre el módulo dinámico a pequeñas deformaciones, y la succión en ensayos en limos y arenas en los que midió succiones de hasta 800 kPa con una placa de succión. Richards (1978) utilizó psicrómetros para medir succiones de hasta 3 000 kPa y propuso una relación entre el módulo de corte y el logaritmo de la succión. Delage, *et al*, (1987) realizó ensayos triaxiales con succiones superiores a los 800 kPa y observó también aumentos de la rigidez al corte al aumentar la succión. El módulo de corte aumenta al incrementar la succión, pero su incremento no es ilimitado ya que si el suelo se desatura por completo y llega al estado seco, la succión desaparece. Esta conclusión ha sido corroborada por los resultados de los ensayos sobre limos y arenas en columna resonante por Wu, *et al*, (1984).

Otra importante contribución para el desarrollo de un modelo constitutivo en el comportamiento de suelos no saturados es de Fredlund, Morgenstern y Widger (1978), quienes sugirieron una relación entre el esfuerzo de corte, τ de suelos no saturados y las dos variables de estado de esfuerzo, ω y $u_a - u_w$:

$$\tau = c' + (\omega - u_a) \tan \lambda' + (u_a - u_w) \tan \lambda^b \quad (2.1)$$

Donde c' y λ' son la cohesión y el ángulo de fricción (con respecto al esfuerzo efectivo) a una condición saturada, y λ^b el ángulo de fricción interna con respecto a la succión. Fredlund, Morgenstern y Widger (1978), mostraron experimentalmente que el valor de λ' es igual para condiciones saturadas y no saturadas en ensayos triaxiales sobre muestras compactadas a contenidos de agua constante. Donde todos los puntos de falla se graficaron en el espacio $\lambda' u_a - u_w, ((\omega_1 + \omega_2)/2) - u_a$ (Fig. 2.12). Los puntos de falla fueron generados en la superficie plana. Valores de λ', λ^b y c' de los resultados y, los cuales se emplearon para definir la ecuación (2.1).

Gulhati y Satija (1981) examinaron la resistencia al corte de suelos no saturados llevados a cabo en ensayos triaxiales bajo condiciones drenadas y contenidos de agua constante. Gulhati y Satija correlacionaron la resistencia de falla con el esfuerzo neto y succión, introduciendo dos factores de fricción. Ellos representaron gráficamente los puntos de falla en la superficie definida por $q, \omega u_a$ y $u_a - u_w$, concluyendo que la resistencia de suelos no saturados puede definirse en términos de dos variables de estado de esfuerzos, ωu_a y $u_a - u_w$.

Escario y Sáez (1986) presentaron resultados que sugieren la necesidad de modificar la ec. 2.1, y realizaron ensayos de corte directo en condiciones drenadas sobre arcillas a diferentes valores de succión controlada, en la (Fig. 2.13) se muestran los resultados de unos suelos usados. Los resultados indicaron que λ^b en la ec. 2.1 no fue constante para un tipo de suelo dado.

Gan, Fredlund y Rahardjo (1988), también observaron la no-linealidad del esfuerzo de corte con la succión en ensayos triaxiales. Cada ensayo de corte se realizó a valores de succión controlada. A bajos valores de succión el valor de λ^b resultó aproximadamente igual a λ' , y λ^b comenzó a caer conforme la succión incrementaba (Fig. 2.14).

La no-linealidad del esfuerzo de corte con la succión fue más aparente en los ensayos de corte directo realizados por Escario y Juca (1989), donde la componente de la resistencia debido a la succión alcanzó un máximo a un valor particular de succión, y posteriormente comenzó a disminuir. Teóricamente si la succión se incrementa indefinidamente el suelo debe alcanzar finalmente un estado seco, y la ec. 2.1 será reducida a la relación de Mohr-Coulomb para suelos secos. Para satisfacer esta condición λ^b debe caer a cero a valores muy alto de succión. La validez general de este criterio de rotura ha sido, sin embargo, cuestionada en varias referencias. Los aspectos específicos observados o deducidos, correspondientes a hipótesis implícitas en su ecuación, son las siguientes:

- El efecto de la succión desaparece al llegar al estado seco, por lo que el incremento de la resistencia al corte del suelo debe disminuir al llegar a él, hasta el correspondiente al estado saturado. Esto implica la existencia de cierto máximo intermedio que si bien se puede producir para grados de saturación bajos de las situaciones ingenieriles habituales, invalida al carácter general del criterio. Este aspecto ha sido señalado por Alonso y Lloret (1985) o Escario y Sáez (1986), y comprobado experimentalmente por Escario y Sáez (1986) realizando en ensayos a corte directo con succión controlada.
- Se ha observado que λ^b es también variable en rangos de succión bajos, como describe Escario y Sáez (1986). Fredlund, *et al*, (1987) indica que λ^b pasa a valer λ' para valores de succión bajos; en estas condiciones considera que λ^b puede suponerse constante, salvo para dicho rango de succiones en que λ^b se convierte en λ' . Delage, *et al*, (1987) obtienen análogamente valores de λ^b dependientes de la succión al ensayar arcillas en un equipo triaxial.

En consecuencia, el criterio propuesto por Fredlund, *et al*, (1978) puede desviarse de la realidad dependiendo de los rangos de succión utilizados o del tipo de suelo ensayado, aún cuando suele considerarse válido para variaciones suficientemente pequeñas del estado de esfuerzos. En general, la determinación de la resistencia al corte para suelos parcialmente saturados no está completamente resuelta. Los resultados experimentales han permitido definir la no-linealidad de la envolvente de resistencia respecto a la succión. Sin embargo, en lo que se refiere a los modelos de comportamiento, se han observado las grandes dificultades en las formulaciones teóricas (Bishop, *et al*, 1960; Fredlund, *et al*, 1978), aunque exista una tendencia a aplicar las teorías del estado crítico para la expresión de las envolventes de resistencia (Alonso, *et al*, 1987; Toll, 1990).

2.2.8 Suelos compactados

La compactación es uno de los varios procedimientos de mejora de un suelo que interviene en construcción. Por sus características, dentro de los procedimientos de mejora del terreno, se define como un método mecánico basado en la expulsión del aire que ocupan los poros del suelo, y en la reducción rápida del índice de vacíos a humedad constante. Se aplica en la construcción de rellenos artificiales como presas, terraplenes, caminos, etc, y en algunas ocasiones en terrenos naturales, como en el caso de las cimentaciones sobre arenas sueltas. El conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales compactados y de las condiciones de trabajo de los mismos en la estructura que se construye, son indispensables para dimensionarla y asegurar su estabilidad. Por esta razón, se han desarrollado procedimientos y técnicas experimentales de laboratorio, e *in situ*, que han tratado de reproducir los procesos de compactación reales.

El objetivo básico de la compactación de un suelo es obtener un nuevo material (suelo compactado) que tenga un comportamiento adecuado para la aplicación específica. La compactación genera en el suelo deformaciones permanentes que modifican sus propiedades originales causando, entre otros, los efectos siguientes:

- 4 Densificación del suelo (aumento de la densidad seca)
- 4 Aumento de la resistencia mecánica
- 4 Aumento de la rigidez
- 4 Reducción de la permeabilidad
- 4 Reducción de la erosión

Estos son algunos de los efectos más importantes, pero también altera la estructura del suelo y modifica la anisotropía mecánica (Rico y del Castillo, 1976).

Los suelos no saturados formados por el proceso de compactación son muy heterogéneos, con grupos de partículas que forman agregados. Los pequeños vacíos dentro de los agregados están normalmente llenos de agua, de tal manera que cada agregado individual consiste de suelo saturado (Brackley, 1975). Los vacíos inter-agregados se llenan con aire o una mezcla de aire con agua, de tal manera que el suelo está no saturado a nivel macro-escala (Fig. 2.15). Brackley (1975), investigó el comportamiento de los suelos compactados en términos de “relación de vacíos en agregados”. La presión de agua de poros negativa que se desarrolla entre los agregados durante la compactación previene su rompimiento. En los suelos compactados de granos finos se requiere fuerzas mayores para romper estos agregados, debido a la elevada succión que mantiene unido cada agregado; mientras que los suelos compactados

de granos de cuarzo, la relativa baja succión implica que los agregados pueden destruirse fácilmente. En la Fig. 2.15a, se muestra una estructura de suelo compactado no saturado con un alto grado de saturación. La fase acuosa es continua mientras que la de aire es discontinua. Este tipo de estructura existe normalmente en suelos arcillosos compactados. En la Fig. 2.15b, muestra la estructura de suelos compactados no saturados de granos finos en un grado ligeramente bajo de saturación donde las fases aire y agua son a menudo continuas. Esta fase de agua es normalmente discontinua en suelos compactados en granitos de cuarzo, (Fig. 2.15c), debido al bajo contenido de agua.

Los factores que afectan la fabricación de suelos compactados de grano fino se han estudiado por varios investigadores en las últimas décadas. Seed y Chan (1959), observaron que los suelos compactados presentaban una estructura floculada cuando el suelo se compactaba a un contenido de agua del lado seco del óptimo de compactación y una estructura dispersa cuando el suelo se compacta a un contenido de humedad del lado húmedo del óptimo de compactación (Fig. 2.16), además Seed y Chan observaron que la retracción axial que ocurre al secar el suelo compactado a un contenido de humedad en el lado seco del óptimo es apreciablemente menor que la contracción del suelo compactado a un contenido de humedad del lado húmedo del óptimo.

Seed y Chan (1959), examinaron el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos compactados a contenidos de humedad del lado húmedo y seco del óptimo. Se observó una elevada rigidez para los suelos compactados con contenidos de humedad del lado seco del óptimo y baja rigidez para los suelos compactados del lado húmedo del óptimo. Sin embargo se encontró que la resistencia al corte era aproximadamente igual en ambos casos. También examinaron la influencia del método de compactación. A contenidos de humedad del lado seco del óptimo, las muestras compactadas estática y dinámicamente presentaron comportamientos similares en esfuerzo-deformación. En contenidos de humedad del lado húmedo del óptimo, las muestras compactadas estáticamente presentaron valores significativamente mayores en rigidez que las compactadas en condiciones dinámicas.

Barden y Sides (1970), analizaron el efecto de la estructura sobre el comportamiento de los suelos no saturados, concluyendo que para los suelos compactados del lado seco del óptimo, el asentamiento en una etapa de carga fue pequeño, presentando mayor problema en los fenómenos de colapso o expansión del suelo durante el humedecimiento. En suelos compactados para un contenido de humedad del lado húmedo del óptimo, el asentamiento en la etapa de carga fue mayor, mientras que el fenómeno de colapso o expansión al humedecimiento, no resultó importante.

Resultados de suelos compactados del lado seco del óptimo cuando se llevan a un proceso de humedecimiento, muestran un fuerte colapso (o hinchamiento si el suelo está a una densidad alta), en tanto que las deformaciones en ensayos similares sobre muestras compactadas del lado húmedo del óptimo son más pequeñas. Una estructura abierta colapsable de agregados de arcilla y/o arena y partículas de limo son la explicación aceptada para deformaciones de colapsos mayores sobre el lado seco (Gens, 1995). Como se discutió en Alonso, *et al*, (1992), esta explicación convencional no es demostrada por los resultados del tipo de programas de ensayos usualmente realizados en suelos compactados. Los especímenes compactados sobre el lado seco y húmedo del óptimo no sólo difieren en la fabricación inicial, sino también en la succión anterior a la etapa de humedecimiento. Para aislar el efecto de fabricación del efecto de las condiciones de esfuerzo y succión anteriores a la etapa de humedecimiento, se requiere diseñar ensayos apropiados.

2.3 Técnicas experimentales

2.3.1 Técnicas experimentales de aplicación y medida de la succión

En la Fig. 2.17 (Gens y Romero, 2000) se indican las técnicas experimentales de control de la succión (o contenido de humedad) en suelos, que utilizan principalmente dos métodos:

- ∉ La transferencia de vapor, que está asociada a la succión total, Φ
- ∉ La transferencia predominante de agua líquida, ligada a la definición de succión matricial $s = u_a - u_w$

Con referencia a la primera técnica, ésta se implementa controlando la humedad relativa dentro de un sistema termodinámicamente cerrado, transfiriéndose únicamente vapor con el suelo. La humedad relativa se relaciona con la succión total (Φ) mediante la ecuación psicométrica (Freudlund y Rahardjo, 1993). Como se indica en la Fig. 2.17, la humedad relativa, u_v/u_{v0} , se controla mediante disoluciones acuosas, utilizando solutos no volátiles (disoluciones salinas) o volátiles (disoluciones de ácidos). En el cociente de humedad relativa, u_v representa la presión de vapor controlada por la disolución, y u_{v0} la presión de vapor de saturación del solvente, que depende principalmente de la temperatura y está parcialmente afectada por la presión de la fase gaseosa.

Con respecto a las disoluciones de ácido, uno de los más empleados es el sulfúrico, que puede utilizarse en el siguiente rango de humedad relativa $u_v/u_{v0} = 0.86$ y 0.05 (o entre $\Phi = 20$ MPa y 400 MPa). Valores de u_v/u_{v0} superiores a 0.86 son difíciles de controlar ajustando la densidad de la disolución ácida, que es el método para controlar la concentración. Por otro lado, valores de u_v/u_{v0} inferiores a 0.05 generan presiones de soluto $u_{\text{ácido}}/u_v > 1 \times 10^{-7}$, que pueden afectar la estructura química de los suelos. Con referencia a las disoluciones salinas, éstas llegan a utilizarse parcialmente saturadas (concentraciones de soluto inferiores a la solubilidad de la sal a una temperatura dada) o saturadas (concentraciones de soluto iguales o ligeramente superiores a la solubilidad, tal como se indica en la Tabla 2.1). En general el límite superior de humedad relativa controlada se sitúa en $u_v/u_{v0} < 0.97$ (o $\Phi > 4$ MPa), debido principalmente a los efectos de las variaciones de la temperatura. Pequeñas variaciones de la temperatura ambiente de $\partial 0.5$ °C a presión de vapor constante, inducen variaciones de humedad relativa del orden de $\partial 0.03$ (o cambios equivalentes en la succión total de aproximadamente $\partial 4$ MPa). Delage, *et al*, (1998) recomienda el equilibrado en vapor para valores de $\Phi \geq 10$ MPa. La Tabla 2.1 indica la succión total y la humedad relativa de algunas disoluciones saturadas de solutos no volátiles o poco volátiles. La dependencia de la humedad relativa con la temperatura $T(K)$ se expresa de la siguiente manera: $u_v/u_{v0} = A \exp(B/T)$.

La transferencia de vapor se puede realizar por simple difusión, colocando la muestra en un recipiente cerrado, o en un sistema de convección forzada de aire, donde se transporte el vapor, ya sea pasando por los contornos de la muestra o atravesándola. Este último procedimiento es el más eficiente aunque se limita a estados con continuidad de aire, generalmente asociados a grados de saturación $S_r < 0.90$. En la Fig. 2.17 se indican algunos periodos de equilibrado típicos para suelos arcillosos con una distancia de drenaje de 10 mm. Con respecto a los métodos de control de la succión con predominio de transferencia de agua líquida, indicados en la Fig. 2.17, el más utilizado es la traslación de ejes. Este método experimental está basado en la técnica introducida por Hilf (1956) para medir presiones de agua en suelos parcialmente saturados con continuidad de aire (generalmente con $S_r < 0.95$), incrementando la presión de esta fase.

Se asume que el incremento de presión de la fase gaseosa origina un incremento igual en la presión de la fase líquida. Este incremento debe ser tal que permita medir y controlar de la presión de la fase líquida. La técnica se ha evaluado satisfactoriamente en forma experimental en el rango de S_r entre 0.76 y 0.95 por Fredlund y Morgenstern (1977), y recientemente por Tarantino, *et al.*, (2000) para S_r variables entre 0.56 y 0.77. Como se indica en la Fig. 2.17, existen dos procedimientos para esta técnica: el método de la sobrepresión de aire con presión de fase gaseosa constante y el de la subpresión de agua con presión de la fase líquida constante. Las primeras aplicaciones utilizaron el segundo procedimiento, manteniendo la presión de agua en condiciones atmosféricas (equipo convencional de placa de presión). Sin embargo, la manipulación de la presión de aire para controlar la succión matricial en suelos cercanos a saturación, genera una compresión del esqueleto que puede ser importante. Al no existir casi continuidad de aire, la presión aplicada en esta fase actúa como si fuera un esfuerzo total sobre el suelo. Por esta razón, si se tiene que elevar la presión de aire en estados cercanos a saturación, es preferible cambiarla lentamente y antes de cualquier trayectoria de carga, para evitar alcanzar estados de saturación aún mayores.

Tabla 2.1 Valores de humedad relativa y succión total obtenidos con diferentes soluciones saturadas (adaptado de Lide y Frederikse, 1997; Romero, 2001).

Compuesto	T(°C)	A(%)	B(K)	u_v/u_{v0} A 25°C	Φ (MPa) a 25°C	Solubilidad g/100g H ₂ O a 30°C
NaOH·H ₂ O	15-60	5.48	27	6	386	119
LiBr·2H ₂ O	10-30	0.23	996	6	386	193
ZnBr ₂ ·2H ₂ O	5-30	1.69	455	8	347	529
KOH·2H ₂ O	5-30	0.014	1924	9	330	126
LiCl·H ₂ O	20-65	14.53	-75	11	303	86
CaBr ₂ ·6H ₂ O	11-22	0.17	1360	16	251	102
LiI·3H ₂ O	15-65	0.15	1424	18	235	170
CaCl ₂ ·6H ₂ O	15-25	0.11	1653	29	170	170
MgCl ₂ ·6H ₂ O	5-45	29.26	34	33	152	58
NaI·2H ₂ O	5-45	3.62	702	38	133	192
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	10-30	1.89	981	51	92	153
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	5-35	25.28	220	53	87	85
KI	5-30	29.35	254	69	51	153
SrCl ₂ ·6H ₂ O	5-30	31.58	241	71	47	57
NaNO ₃	10-40	26.94	302	74	41	96
NH ₄ Cl	10-40	35.67	235	79	32	41
KBr	5-25	40.98	203	81	29	71
(NH ₄) ₂ SO ₄	10-40	62.06	79	81	29	78
KCl	5-25	49.38	159	84	24	37
Sr(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	5-25	28.34	328	85	22	89
BaCl ₂ ·2H ₂ O	5-25	69.99	75	90	14	38
CsI	5-25	70.77	75	91	13	38
KNO ₃	0-50	43.22	225	92	11	46
K ₂ SO ₄	10-50	86.75	34	97	4.2	13

Existen dos tipos de elementos separadores de presiones de fluidos cuando se aplica la técnica de traslación de ejes: las membranas saturadas de acetato de celulosa y las cerámicas de alto valor de entrada de aire (AVEA) (Fig. 2.17). Las membranas, aunque permiten alcanzar una diferencia máxima de presiones entre fluidos alrededor de 7 MPa y están asociadas a periodos de equilibrio de menor duración, son más compresibles, menos duraderas ante ataques químicos y biológicos, y presentan mayor difusión de aire. Este último aspecto limita su utilización en trayectorias de humedecimiento, debido a la facilidad de perder la continuidad de la transferencia líquida por las burbujas acumuladas debajo de la membrana. Por otra parte, las cerámicas AVEA pueden resistir una diferencia máxima de presiones entre fases de 1.5 MPa.

Los problemas más importantes de aplicación de la técnica de traslación de ejes, se refieren al control de la humedad relativa en los sistemas de regulación de presión de la fase gaseosa, y a la acumulación de aire disuelto debajo de los elementos separadores de presiones de fluido. Este fenómeno conlleva a la progresiva pérdida de continuidad en la transferencia de la fase líquida debido a la acumulación de aire debajo de la cerámica AVEA, o de la membrana. Por esta razón se requiere un equipo auxiliar en el sistema de regulación de presión de agua que permita transportar y atrapar las burbujas de aire en otro lugar que no interfiera con la transferencia de líquido. La expresión que describe la velocidad de acumulación de aire disuelto, dV_d/dt , debajo de los elementos separadores de presiones de fluidos es (Romero, 1999; Fredlund y Radjo, 1993):

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{nADh}{u_w} \frac{4u_a - u_w}{2u_{atm} + u_w} \quad (2.2)$$

Donde n , A y t_c representan la porosidad, el área en contacto con el suelo y el espesor de los elementos separadores; h , el coeficiente volumétrico de la solubilidad de aire disuelto en agua ($h = 0.018$ a 22°C); D , el coeficiente de difusión de aire a través del elemento separador saturado; u_{atm} , la presión atmosférica, y u_w y u_a las presiones relativas de las fases líquida y gaseosa, respectivamente. Para cerámicas AVEA con porosidad $n=0.31$, D varía entre 6×10^{-11} y 1×10^{-10} m^2/s a 22°C (Romero, 1999). De la ecuación (2.2) se obtiene que para una configuración dada del elemento separador, y para una succión matricial definida, la difusión de aire se puede controlar aumentando la presión absoluta de la fase líquida. Como se observa, la técnica convencional de la placa de presión, donde se mantiene la presión de agua en condición atmosférica, es la configuración menos eficiente para controlar la difusión de aire. En la Fig. 2.21 se muestra un esquema del montaje experimental de la técnica de traslación de ejes aplicada en un ensayo edométrico, donde se observa el circuito de recolección y medida del volumen de aire disuelto.

Otro de los métodos de transferencia líquida indicados en la (Fig. 2.17) es la técnica osmótica, que controla la succión variando la concentración de una disolución con soluto de elevada masa molecular que se pone en contacto con el suelo a través de una membrana semipermeable (impermeable al soluto y permeable al disolvente). De esta manera existirá una transferencia de fase líquida hasta que el agua del suelo y del disolvente presente el mismo potencial químico. El soluto más usado es polietilenglicol PEG con masa molecular de 20 000 o 35 000 kg/kmol . Como membranas, se utilizan actualmente dos tipos:

- a) Membranas de tipo asimétrico (polietersulfona de aprox. 0.17 mm de espesor) con una capa pelicular densa en contacto con el suelo, y una base más porosa en contacto con la disolución

- b) Membranas simétricas con una estructura porosa más homogénea de acetato de celulosa (aprox. 0.07 mm de espesor)

Otra propiedad de las membranas es la masa molecular de corte, que define el valor máximo de masa molecular separado por ésta (al menos 90 % retenido). Usualmente está alrededor 12 000 a 14 000 dalton (asociado a un tamaño de poro entre 3 y 10 nm), por lo que la membrana sería impermeable a solutos con masa molecular superior a dicho valor. Actualmente se prefieren las de polietersulfona, debido a que son más estables con el tiempo, y presentan una mejor eficiencia en el corte del soluto (Slatter, 2000).

La calibración de concentración de PEG y presión osmótica generada, depende principalmente del tipo de membrana y de la técnica de medida (con psicrómetro/superficie libre de solución, o con tensiómetro/membrana), y en menor medida de la masa molecular del PEG. La Fig. 2.18 representa una compilación de calibraciones para diferentes membranas, técnicas de medida y masas moleculares de PEG (entre 6 000 y 35 000 kg/kmol). La calibración a superficie libre con psicrómetro representa la cota superior de presión osmótica para una concentración dada de PEG, ya que la membrana afecta a la actividad de la disolución. La máxima succión aplicada con esta técnica es de aproximadamente 1.5 MPa, limitada por la viscosidad de la disolución y la dificultad de su transporte. Una revisión actualizada de la técnica osmótica se presenta en Slatter *et al* (2000), y en Tarantino y Mongiovì (2000). En Dineen (1997) y Tarantino y Mongiovì(2000), se incluyen los detalles del montaje experimental cuando se utiliza esta técnica en un equipo edométrico.

De acuerdo con lo indicado, la técnica osmótica requiere calibraciones específicas y en concordancia con el montaje experimental, además de precisar de un sistema de medida de succión independiente.

Finalmente, dentro de los sistemas de transferencia líquida indicados en la Fig. 2.17, cabe presentar la técnica de pulsos controlados de agua. Esta técnica, donde la succión se estima a partir de una curva de retención, presenta una alternativa para conseguir estados de saturación que difícilmente podrían alcanzarse con traslación de ejes debido a problemas de aire atrapado. Igualmente, es una técnica alterna para reducir tiempos de equilibrado en trayectorias de humedecimiento, que puede aplicarse en condiciones *in situ* (Houston, *et al*, 1995; Abdrabbo, *et al*, 2000). Sin embargo, los ensayos de colapso utilizando la técnica de pulsos controlados y realizados en el laboratorio, han evidenciado que la mayoría del colapso se experimenta en los primeros pulsos, aunque el grado de saturación global sea bajo, debido al elevado grado de saturación local que se alcanza en el contacto con la piedra porosa de drenaje (Houston, *et al*, 1993). En la Tabla 2.2 se presentan diferentes equipos y técnicas experimentales para medir la succión, tanto al nivel de laboratorio como en condiciones *in situ*.

La clasificación más general corresponde a la separación en métodos directos e indirectos. Los primeros miden la humedad relativa del aire en el suelo (relacionada con la transferencia de vapor y la succión total), así como la tracción de la fase líquida (relacionada con la succión matricial). Los indirectos hacen uso de diferentes fenómenos físicos asociados al contenido de humedad de un medio poroso en contacto o no con el suelo, como la variación de su masa (método de papel de filtro), de la resistencia/conductividad eléctrica (higrómetros resistivos), de la capacidad (higrómetros capacitivos), de la conductividad térmica (sensores de conductividad térmica) y de la constante dieléctrica (sensores TDR). En la Tabla 2.2, el tiempo de equilibrado de estos sensores indirectos es generalmente mayor.

Una revisión exhaustiva de los diferentes métodos de succión se detalla en Lee y Wray (1992); Fredlund y Rahardjo (1993); Lee y Wray (1995), y en Dineen (1997). Harrison y Blight (2000) compararon varias técnicas de medida de succión en condiciones *in situ*.

Tabla 2.2 Resumen de diferentes equipos y técnicas de medida de succión (Gens y Romero 2000).

Equipo	Succión	Fenómeno medido	Rango (MPa)	Tiempo equilibrado
Psicrómetro de transistor SMI	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0.3 – 25 70 equipos mejorados	minutos
Psicrómetro de termopares WESCOR	Total Osmótica	Humedad relativa (diferencia Temp.)	0.3 – 7	minutos
Higrómetro capacidad/resistivo	Total	Humedad relativa (capacida/resisten.)	10 – 400	minutos
Higrómetro de espejo (punto rocío)	Total	Humedad relativa (diferencia Temp.)	3 – 400	minutos
Papel de filtro	Total (sin contacto) Matricial (contac.)	Contenido de humedad	0.4 – 40	mín 7 días
Placa de succión	Matricial	Tracción de agua	0 – 0.08	horas/días
Placa de presión con membrana acetato	Matricial	Traslación de ejes	0 – 7	días/semanas
Tensiómetro	Matricial	Tracción de agua	0 – 0.08	minutos
Tensiómetro Imperial College	Matricial Total (sin contacto)	Tracción de agua	0 – 2.1	minutos
Celulosa porosa (bloque de yeso, fibra de vidrio)	Matricial	Resistencia eléctrica	0 – 1.5	días/semanas
Conductividad térmica	Matricial	Conductividad térmica	0 – 1.5	días/semanas
Sensor TDR con cerámica (también se usa s/cerámica)	Matricial	Constante dieléctrica	0 – 0.3 (60% porosidad de cerámica)	horas/días
Técnica de Squeezing	Osmótica	Conductividad eléctrica	0 – 3	horas/días

2.3.2 Técnicas de traslación de ejes

En la actualidad existen dos planteamientos diferentes para control de la succión: uno, mecánico y otro energético (termodinámico). En el primero, el control de la succión se realiza por aplicación directa de una tracción al agua, que se pone en contacto con el suelo a través de un dren (placa de succión), o por la aplicación de una presión neumática positiva a la fase gaseosa de los poros del suelo, que está

separada del agua libre a través de un material semipermeable (membrana o piedra porosa de alta resistencia al paso del aire). Este último planteamiento se denomina método de traslación de ejes, y fue desarrollado por Hilf (1956) con objeto de aplicar presiones intersticiales negativas. En el segundo se utiliza el potencial de succión del agua del suelo a través de la energía libre relativa del gas en equilibrio con la fase líquida de suelo. La energía libre (λ_f) necesaria para mover el agua pura a la presión de referencia (normalmente la atmosférica) hasta los poros del suelo es igual al potencial de succión total:

$$\lambda_f = \lambda_t = RT \ln (p/p_o) \quad (2.3)$$

Donde, p es la presión de vapor del agua en el suelo, y p_o la presión de vapor del agua pura libre, siendo p/p_o la humedad relativa (h_r); R la constante de los gases, y T la temperatura absoluta. La presión de vapor está influenciada por dos factores: uno es el radio del menisco de la interfase aire-agua (efecto capilar); y el segundo la composición de la solución del agua, relacionada con la concentración de la disolución y con el peso molecular de la sal (efecto osmótico). La succión total se relaciona con la ecuación de la energía libre (ecuación 2.3), sustituyendo el valor del potencial de succión por $\lambda_t = -g v_w \dots$:

$$\dots \left| \frac{RT}{v_w g} \ln h_r \right. \quad (2.4)$$

Donde \dots es la succión total del agua en el suelo, y v_w el peso específico del agua. La técnica de traslación de ejes, se ha usado para aplicar diferentes etapas de succión matricial. El procedimiento en esta investigación implicó una traslación de la referencia de la presión de aire de poros a una presión constante (u_a), el cual puede ser considerado como un incremento artificial en la presión atmosférica, bajo el cual el ensayo se realizaba. Consecuentemente, la presión de agua de poros negativa es también incrementada por una cantidad igual a la presión de agua positiva (u_w) en orden de mantener una succión matricial constante ($u_a - u_w$) (técnica de traslación de ejes para medidas de presión de agua de poros; Hilf, 1956). La presión de agua de $u_w = 0.1, 0.3, 0.6, 0.75, 0.85, 0.88$ y 0.89 MPa han sido seleccionadas para diferentes etapas de succión bajo un valor constante de presión de aire de $u_a = 0.9$ MPa. Cuando la succión fue aplicada en forma continua, la presión de agua, u_w , se incrementa a 0.02 MPa/día con una presión de aire constante de $u_a = 0.9$ MPa. Un disco cerámico (AVEA) con valor de entrada de aire más grande que la succión matricial aplicada de 0.8 MPa, se empleó como una interfase entre el suelo no saturado y el sistema de presión de agua de poros, actuando como un enlace entre el agua de poros en el suelo y el agua del sistema de medida y así evitar el paso de aire libre al interior del mismo sistema. Este disco cerámico tiene un tamaño de poros muy pequeños y en la condición saturada, solamente permite el paso de agua y no del aire. Cada disco presenta un valor de entrada de aire, que es la presión de aire por la cual desplaza al agua, y fluye a través del disco cerámico; esta presión crítica depende del tamaño de los poros del disco cerámico, si presenta un valor de entrada de aire mayor más bajo, será la permeabilidad del disco por lo cual al modificar la presión de agua durará más tiempo en alcanzar el equilibrio el agua de poros del suelo. Es por eso que la elección del disco cerámico asume un compromiso para que no limite los objetivos de los ensayos.

En las Fig. 2.19 y 2.20, se presentan las curvas del volumen conocido de agua que pasa a través del disco cerámico, empleando el procedimiento propuesto por Bishop y Henkel (1957), al imponer una presión de aire (u_a) sobre los discos cerámicos. Con ello se verifica la capacidad del disco como barrera separadora antes de comenzar los ensayos con control de succión matricial.

La técnica de traslación de ejes ha sido recientemente aplicada por diferentes investigadores para imponer bajos niveles de succión Gan, *et al* (1988); Balmaceda (1991); Sivakumar (1993); Yuk Gehling (1994); Romero (1999), así como valores relativamente altos en el orden de 7 MPa, Lagny (1996). Es válida para suelos con poros de aire intercomunicados (Olson y Langfelder, 1965; Bocking y Fredlung, 1980). Recientemente Mongiovi y Tarantino (1998) desarrollaron un aparato para investigar la validez de la técnica de traslación de ejes en suelos no saturados ($S_r = 56\%$), previniendo la deformación de la muestra y cambios de contenido de agua. Cuando la presión de aire se modificó no se detectó ninguna variación de la succión matricial dentro del error experimental, midiendo presiones de agua de poros negativas con tensiómetros del Imperial College (Ridley y Burland, 1993).

2.3.3 Células edométricas con control de succión

En la literatura existe una gran variedad de referencias de ensayos para determinar la deformación de los suelos no saturados con succión controlada. Los primeros son los edómetros convencionales que tenían un dispositivo para mantener el suelo aislado del exterior; la succión se aplicaba mediante una columna de mercurio. Estos aparatos denominados edómetros de placa de succión, tenían como limitación valores de succión inferiores a 0.1 MPa (Rengmark y Erikson, 1953); (Alpan, 1957); (Escario, 1965). Posteriormente, con el fin de reproducir directamente en una muestra de suelo (inalterada o remoldeada), la variación de la succión a que se va a someter en el terreno, así como los cambios de las cargas exteriores, se desarrollaron diversos aparatos que permiten gran variedad de trayectorias de esfuerzos, de tal forma que se pueda conocer mejor el comportamiento deformacional de los suelos no saturados.

Escario (1967 y 1969), desarrolló un aparato que se basa en el mismo principio utilizado en los aparatos de placa o membrana de presión. El aparato sufrió algunas modificaciones (Escario y Sáez, 1973), donde la muestra se confina lateralmente en un anillo, similar al del edómetro convencional, y colocada en contacto con una membrana semipermeable, o una piedra porosa de alto valor de entrada de aire, que se asienta sobre una placa porosa de grano grueso, saturada y en contacto directo con el agua libre (a presión atmosférica).

Posteriormente, otras células análogas se diseñaron para controlar la presión de aire y agua mientras se miden los cambios de volumen y de agua en el suelo, Barden, *et al* (1969); Chang (1969); Aitchison y Wodburn (1969); Moore y Millar (1971), y Fredlund y Morgenstern (1976). En la Fig. 2.21 se presenta el esquema de la célula edométrica con control de succión desarrollada por Lloret (1982); edómetros similares se utilizaron por Balmaceda (1991); Yuk Gehling (1994); Vilar (1995) y Romero (1999). Se emplearon para investigar comportamientos de hinchamiento, colapso y retracción, bajo un esfuerzo vertical neto; así como comportamientos de carga y descarga bajo succión matricial constante.

Kassiff y Ben Shalom (1970 y 1971), basándose en la técnica de las membranas osmóticas, desarrollaron un edómetro que permite controlar la succión del suelo con el principio osmótico del flujo de agua a través de una membrana semipermeable, más recientemente adoptado por Delage, *et al* (1987). Una revisión actualizada de la técnica osmótica se presenta en Sattler *et al.* (2000), Tarantino y Mongiovi (2000), y Romero (2001).

En los suelos no saturados, de forma análoga a los saturados, para determinar el estado de esfuerzo actuante en un elemento de suelo es necesario conocer los esfuerzos principales (vertical y horizontal), y la succión en cada instante del ensayo. La medida de la presión lateral durante el proceso de carga y

expansión de un suelo no saturado proporcionan información de gran importancia para el desarrollo de modelos constitutivos. Con tal objetivo Cuellar (1978), modificó el anillo portamuestras del ensayo, construyendo un nuevo anillo en cuyo interior se instaló una banda extensométrica, que permite cuantificar los esfuerzos producidos en el sentido radial. Habib, *et al* (1995), y Habib (1995), describe un edómetro incorporando una célula de carga insertada en el anillo edométrico, midiendo la presión lateral. Romero (1994, 1999), presenta el diseño de un edómetro donde la succión se controla con la técnica de traslación de ejes con medidas del esfuerzo lateral, donde el esfuerzo lateral es controlada manteniendo una deformación nula sobre las paredes del anillo por medio de la variación de la presión de aceite en la cámara de confinamiento, la cual rodea el anillo (Fig. 2.22).

2.3.4 Célula triaxial con control de succión

Los primeros aparatos desarrollados para el estudio de la resistencia al corte en suelos no saturados fueron presentados por Bishop, *et al* (1960); Bishop (1961), y Bishop & Donald (1961) (Fig. 2.23). Consistían en una célula triaxial modificada, que permitía la medida o control de la presión de agua y aire, y medidas independientes de los cambios volumétricos de agua y del cuerpo de la probeta. A partir de estos estudios se desarrollaron varios equipos siguiendo las mismas bases conceptuales de aplicación y control de la succión.

Las investigaciones conducidas y presentadas por Bishop, *et al* (1960), y Gibas, *et al* (1960) destacaban algunos problemas relativos al control del ensayo: las piedras porosas tenían una pequeña resistencia al paso del aire; la permeabilidad al aire de las membranas que envolvían las probetas; la presencia de burbujas de aire en el sistema de medida de presión intersticial; y las dificultades de medir los cambios volumétricos de las probetas, que muchas veces se mezclaban con la deformación de la propia célula. Los problemas relativos a las dificultades de medir los esfuerzos intersticiales negativos y la necesidad de piedras porosas con mayor resistencia al paso de aire han sido comentados desde Croney, *et al* (1952), y Hilf (1956). Posteriormente hubo investigaciones para analizar las expresiones efectivas, y resistencia al corte (Blight, 1967; MIT, 1963; Satija, 1978; Escario, 1980). En estudios de resistencia al corte, en suelos no saturados, la medida de presión intersticial o el control de la succión ha tenido continuidad y se le ha dado importancia a lo largo del tiempo, Verbrugge (1978) y Edil, *et al* (1981 y 1984), utilizan células triaxiales modificadas en la base y en su parte superior para instalar psicrómetros. Toll (1988), utiliza una sonda con transductores de presión intersticial, instaladas a media altura de la probeta. Las investigaciones conducidas en el Imperial College (Londres) para el estudio de la resistencia al corte utilizaron una célula triaxial hidráulica con control de la succión, modificada a partir del aparato desarrollado por Bishop y Wesley (1975). Los detalles respecto al control de la succión, de las medidas de los desplazamientos de la probeta (axial y radial), medida de cambios volumétricos de la probeta asociados al flujo de aire y agua, y los procedimientos de ensayo se presentan en Maswoswe (1985); Toll (1988); Schreiner (1988), y Josa, *et al* (1987), y Josa (1988).

Los primeros resultados experimentales sobre suelos no saturados los presentaron Bishop y Donald (1961); se obtuvieron con un aparato triaxial, donde la succión se controló por el método de traslación de ejes. Después de esto, muchos de los trabajos experimentales llevados a cabo, bajo condiciones de succión controlada han tratado con cambios de volumen examinados ya sea bajo condiciones de K_0 en edómetro (Jennings y Burland, 1962; Barden, Madedor y Sides, 1969; Aitchison y Woodburn, 1969; Escario, 1969b; Fredlund y Morgenstern, 1976), o bajo condiciones de esfuerzo isótropo (Matyas y Radhakrishna, 1968). Hasta que las propiedades de resistencia al corte fueron de interés, los pocos datos existentes relacionados con fallas, por ejemplo, determinación del ángulo de fricción y la cohesión del material, se complementaron con datos de ensayos de corte directo (Escario, 1980).

Algunos ensayos triaxiales también fueron realizados por Gulhati y Satija (1981), Ho y Fredlund (1982).

Más recientemente, resultados relacionados con el cambio del ángulo de fricción y la cohesión como una función de la succión los presentaron Escario y Saez (1986), eran ensayos realizados en arcillas plásticas en un equipo de corte directo, y por Delage, Suraj de Silva y De Laure (1987) sobre un limo compactado. En estos estudios no fueron monitoreados los cambios de volumen durante el corte, y tanto los comportamientos volumétricos y de corte se trataron por separado.

El primer modelo integrado capaz de predecir varios aspectos del comportamiento de suelos no saturados llamado *modelo loading - collapse (LC)* fue presentado por Alonso, Gens y Hight (1987). En este trabajo, el esfuerzo se enfocó esencialmente al comportamiento de cambio de volumen, incluyendo colapso; y el modelo cualitativamente mostró como una teoría elastoplástica extensa podría calcular satisfactoriamente los principales aspectos del comportamiento de los suelos no saturados. Alonso, Gens y Josa (1990) presentaron una versión cuantitativa del modelo LC donde ambos comportamientos, cambios de volumen y esfuerzo de corte fueron predichos dentro un marco de trabajo de una teoría elastoplástica. Más tarde aparecieron los primeros resultados experimentales sobre el comportamiento de cambio de volumen durante ensayos de corte, dentro del marco de trabajo de concepto de estado crítico y elastoplástico.

2.3.4.1 Medidas de volumen en ensayos triaxiales no saturados

En el caso de un ensayo triaxial en condiciones saturadas, los cambios de volumen del espécimen se relacionan con los cambios de agua, y pueden ser fácilmente medidos con una bureta de vidrio graduada, o un controlador de presión-volumen. En un suelo no saturado, tanto los cambios de aire, agua y volumen total del espécimen no pueden medirse tan fácilmente, por lo que en los estudios de los suelos no saturados, los diseños de nuevos equipos triaxiales requieren principalmente la adopción de un método confiable para controlar el desarrollo de un procedimiento preciso para monitorear los cambios de volumen del espécimen. Varios métodos de medidas de cambios de volumen para suelos no saturados se describen en la literatura, pero nos enfocaremos a tres principales categorías de métodos mencionados por Geiser, *et al* (2000):

Medidas de fluido de la cámara de confinamiento

Medidas de la deformación volumétrica de la muestra controlando un fluido en una célula de doble pared, ha sido usado por (Bishop y Donald, 1961; Maswoswe, 1985; Wheeler, 1986; Josa, *et al*, 1987; Sivakumar, 1993; Rampino, *et al*, 1999; Carvalho, 2001, Fig. 2.24). En este método, los cambios de volumen de la muestra son deducidos del cambio de volumen del líquido de confinamiento de la célula. La ventaja del método es su simplicidad. Células triaxiales convencionales pueden usarse, siempre y cuando sean cuidadosamente calibradas frente a cambios de presión.

Medidas directas de volumen de aire y agua

Los cambios volumétricos de la muestra son deducidos por la suma del cambio de volumen de aire y agua. Ambos cambios de volumen se miden por separado con un controlador de presión de volumen. La principal ventaja es que las trayectorias de ensayos pueden ser a presión y volumen de aire controladas e impuestas. Pero pequeños cambios de temperatura y presión atmosférica afectan las medidas (sistema de ensayos de suelos no saturados GDS: Adams, *et al*, 1996).

Medidas directas en la muestra

El método más comúnmente usado es el que involucra sensores de desplazamientos locales adheridos directamente sobre la muestra midiendo deformación axial y radial durante el ensayo (Clayton, 1986).

Otro método es el de transductores de efecto Hall (Clayton, 1986; Clayton, *et al*, 1989); cuando la muestra tiende a una forma de barril, la única medida del cambio radial es en la mitad de la muestra lo cual no se mide con exactitud la deformación radial. Una más es el uso de dos sensores láser electro-óptico externos colocados asimismo en dos posiciones diametralmente opuestas. En este trabajo se utilizó esa técnica para determinar la deformación radial en forma global y local. Otra alternativa de técnicas de medida directa es la basada en procesamiento de imagen (Macari, *et al*, 1997). Este método consiste en la toma de fotografías a través de la célula de metacrilato durante el ensayo; con el análisis de imagen se obtiene el perfil de la muestra y el cambio de volumen.

Se puede encontrar en la bibliografía un gran número de aparatos de medidas de deformación local, tales como: galgas eléctricas, por Burland y Symes (1982) y Jardine, *et al* (1984); transductores de efecto may, por Clayton y Khatrush (1986) y Clayton, *et al* (1989); transductores de proximidad no-contacto, por El-Hosri, *et al* (1981), y Hird y Yung (1987 y 1989); transductores de deformación local (LDTs), por (Goto, *et al*, 1991; Lo Presti, *et al*, 1995; Hoque, *et al*, 1997); y LVDTs miniatura (Cuccovillo y Coop, 1997; Anderson, *et al*, 1997; Romero, 1999; Carvalho, 2001); transductores de proximidad (Cole, 1978; Khan y Hoag, 1979; Symes y Burland, 1984; Shibuya, *et al*, 1994; Scholey, *et al*, 1995); anillo de deformación por medio de galgas (kolymbas y Wu, 1989); transductor resistencia de alambre (Skopek y Cyre, 1995); técnica de imagen digital (Macari, *et al*, 1997; Obaidat, *et al*, 1998), y sistemas de sensores láser electro-óptico (Romero, 1999; Barrera, *et al*, 2000).

2.4 Estado de esfuerzos

Fung (1965) describe “el estado de un sistema”, como la información necesaria en una caracterización completa del sistema para el intento deseado. Los parámetros de estado típico para un cuerpo elástico son referidos como aquellas variables que describen el campo de deformaciones, el campo de esfuerzos y sus geometrías. Las variables de estado deben ser independientes de las propiedades del material en cuestión (coeficiente de Poisson, y módulo elástico en caso de sólido elástico). Una interrelación de esfuerzo versus deformación es una relación constitutiva que describe el comportamiento de un material. Las relaciones constitutivas son expresiones unívocas que relacionan los parámetros de estado (Fung, 1969). Ejemplos de ecuaciones constitutivas que relacionan variables de estado son simples o parciales.

- 4 La variación de la deformación volumétrica al saturar en función del esfuerzo aplicado
- 4 La curva característica de retención de humedad

Otros ejemplos de ecuaciones constitutivas, relacionando variables de estado de esfuerzos son las ecuaciones de resistencia al corte mencionadas, y ecuaciones que proporcionan la presión de poros en función de los esfuerzos totales aplicados.

2.4.1 Estado de esfuerzos para suelos saturados

Los esfuerzos efectivos se pueden definir como aquellas funciones de los esfuerzos totales, y de las presiones intersticiales que controlan todas las relaciones esfuerzo-deformación del suelo. Según el principio de Terzaghi, las relaciones esfuerzo-deformación del suelo dependen exclusivamente del exceso de las presiones totales sobre la presión intersticial. Dos aspectos del principio de Terzaghi son de gran importancia:

1. La presión de poro del agua actúa en el agua y en el sólido en cada dirección
2. Únicamente los cambios en el esfuerzo efectivo explican los cambios en el estado del suelo

El comportamiento de los suelos saturados se controla por cambios en el esfuerzo efectivo, el que define de tal manera que algunos cambios de volumen, deformación de corte o cambios en la resistencia al corte, ocurran sólo debido a cambios en el esfuerzo efectivo. En suelos saturados, el esfuerzo efectivo será igual al esfuerzo total, menos la presión del fluido de los poros:

$$\omega' = \omega - u \tag{2.5}$$

Donde ω' es el esfuerzo efectivo; ω el esfuerzo total, y u la presión de poros; por ejemplo, la resistencia al corte, τ de un suelo saturado se relaciona al esfuerzo efectivo normal, ω' , por la ecuación de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + \omega' \tan \lambda' \tag{2.6}$$

Donde c' es la cohesión, y λ' el ángulo de fricción interna.

Bishop y Eldin (1950) han comprobado experimentalmente el principio de los esfuerzos efectivos en diversos casos y en algunas ocasiones se ha objetado su aplicación. Skempton (1961) ha propuesto formas modificadas para la conocida ecuación de los esfuerzos efectivos con base en ensayos de consolidación hasta altas presiones. Indica el referido autor que la expresión que ajusta correctamente los cambios de volumen y la resistencia al corte es:

$$\omega'_{ij} = \omega_{ij} - K u_w \tag{2.7}$$

Donde K depende de los parámetros del material.

El principio de los esfuerzos efectivos tal como lo estableció Terzaghi es válido y aplicable en la mayor parte de los casos; en suelos saturados, su utilización es generalizada.

2.4.2 Estado de esfuerzos para suelos no saturados

En la Tabla 2.3 se presenta un resumen de las expresiones más comunes propuestas para determinar el esfuerzo efectivo en suelos no saturados (Fredlund y Rahardjo, 1993). Las ecuaciones intentan definir un único esfuerzo efectivo que controle el comportamiento esfuerzo-deformación.

Tabla 2.3 Expresiones de esfuerzos efectivos para suelos no saturados presentadas por diversos autores (Fredlund y Rahardjo, 1993).

Expresión	Componentes	Referencia
$\omega' = \omega - u_a + \theta (u_a - u_w)$	θ = parámetro relacionado con el Sr u = presión de gas y fase de vapor	Bishop (1959)
$\omega' = \omega - \eta' u_w$	η = factor de unión	Croney <i>et al.</i> , (1958)
$\omega = \omega_m \frac{a_a}{a_a + u_w} + R - A$	a_a = fracción del área total que esta en contacto con el aire-aire	Lambe (1960)
$\omega' = \omega + \Phi p''$	Φ = parámetro de cero a uno p'' = presión poro-agua negativa	Aitchison (1961)
$\omega' = \omega + \eta p''$	η = factor estadístico	Jennings (1961)
$\omega = \omega - u_a + \theta_m (h_m + u_a) + \theta_s (h_s + u_a)$	θ_m = parámetro esfuerzo efectivo (succión matricial) h_m = succión matricial θ_s = parámetro de esfuerzo efectivo (succión soluto) h_s = succión soluto	Richards (1966)

Históricamente, el cuestionamiento de una ecuación de esfuerzos efectivos para suelos parcialmente saturados puede resumirse como sigue:

Según *Bishop y Donald* (1961) o *Bishop y Blight* (1963), la ecuación de Bishop (1959) es consistente con los estados de rotura del suelo no saturado compactado, aunque para comprobarlo utilizaron el mismo criterio y parámetros de rotura que los utilizados en suelos saturados.

Jennings y Burlans (1962) cuestionan la validez de la ecuación de Bishop (1959). De acuerdo con los autores, la expresión define un cierto esfuerzo intergranular, que por no controlar el comportamiento del suelo no se puede dominar el esfuerzo efectivo. El parámetro θ depende del tipo de ensayo y de la trayectoria de esfuerzos seguida. El problema crucial reside en determinar el parámetro, θ , que es altamente dependiente de la trayectoria de esfuerzos, y consecuentemente de los ciclos de secados y humedecimiento. Si la trayectoria de esfuerzos es definida convenientemente, el uso del principio parece ser aceptable. La ecuación de Bishop no es capaz de reproducir fenómenos de colapso (*Blight*, 1965). Un proceso de humedecimiento con la consecuente reducción de la presión de agua hace disminuir el esfuerzo efectivo de Bishop (1959), prediciéndose un hinchamiento cuando en realidad, dependiendo del tipo del suelo y del esfuerzo total, puede producirse un colapso.

Aitchison (1965) comenta que todos los factores que influyen en el comportamiento deformacional y de resistencia del suelo afectan a θ , debiendo ser además este parámetro discontinuo para intentar predecir fenómenos de expansión y colapso.

Bishop y Blight (1963), y *Aitchison* (1967) indican que para describir los cambios de volumen de suelos es más propicio utilizar relaciones entre el índice de poros ($\omega-u_a$) y (u_a-u_w).

Coleman (1962) ha sugerido variables de esfuerzo (ω_1-u_a), (ω_2-u_a) y (u_a-u_w) para representar la presión axial, confinamiento y presión poro-agua respectivamente en ensayos triaxiales. Así mismo, *Coleman* establece que los coeficientes que ligan estos esfuerzos con la deformación, dependen del valor de la historia de esfuerzos (succión incluida).

Bishop y Blight (1963) revaluaron el uso de la ecuación de los esfuerzos efectivos y establecieron que un cambio en la succión matricial no siempre resulta ser el mismo en el esfuerzo efectivo. Ellos sugieren que una relación entre el índice de poros con ($\omega-u_a$) y (u_a-u_w) como variables independientes es más apropiada para la descripción de los cambios de volumen del suelo, que el empleo de un único esfuerzo efectivo.

Matyas y Radhakrishna (1968), *Aitchison y Woodburn* (1969), *Barden, et al* (1969), y *Fredlund* (1979) utilizan las variables de esfuerzos para análisis del cambio de volumen. Para el caso de carga axial emplean ($\omega-u_a$), ($\omega_1-\omega_3$) y (u_a-u_w), y cuando se trata de carga edométrica (ω_1-u_a) y (u_a-u_w).

Fredlund y Morgenstern (1976, 1977) presentan un análisis de esfuerzos para el uso de parámetros de estado de esfuerzos independientes y plantean a la vez el equilibrio de las diferentes fases de un suelo no saturado (incluyendo la interfase aire-agua-membrana contráctil). Este análisis es sólo una aproximación. Lo más interesante son sus ensayos de “null-test” que permiten comprobar experimentalmente la hipótesis de los esfuerzos efectivos independientes.

El estado de esfuerzos del suelo se refleja a partir de cualquiera de las siguientes parejas de esfuerzos:

$$\omega_j - u_a l_{ij} \text{ y } (u_a - u_w) l_{ij} \quad (2.8)$$

$$\omega_j - u_w l_{ij} \text{ y } (u_a - u_w) l_{ij} \quad (2.9)$$

$$\omega_j - u_a l_{ij} \text{ y } \omega_j - u_w l_{ij} \quad (2.10)$$

La primera opción es la más utilizada ya que permite separar los cambios de esfuerzos totales y los cambios de presión de agua. La presión de aire puede considerarse igual a la atmosférica, cuando el suelo no está cercano a la saturación. Por otro lado, facilita una transición continua al caso saturado al ser nula la succión, y (ωu_a) coincide con (ωu_w) . En la Tabla 2.4 se resumen las posibles variaciones de estado de esfuerzos para un suelo no saturado según Fredlund (1993).

Bocking y Fredlund (1980) indicaron que $(u_a - u_w) l_{ij}$ es una expresión cuando el grado de saturación es bajo, o sea que los poros con aire estén conectados. Cuando el suelo llega a la saturación, la presión de agua (u_w) es igual a la presión de aire (u_a) y el estado de esfuerzos del suelo pasa a ser $\omega_j - u_w l_{ij}$, en tanto que la succión $(u_a - u_w)$ tiende a cero.

Tabla 2.4 Posibles combinaciones de variables de estados de esfuerzos según Fredlund (1993).

Presión de referencia	Variables de estados de esfuerzos s
Aire (u_a)	(ωu_a) y $(u_a - u_w)$
Agua (u_w)	(ωu_w) y $(u_a - u_w)$
Total (ω)	(ωu_a) y (ωu_w)

2.4.3 Parámetros de estado

Según Poorooshab (1961), los parámetros de estado son definidos como aquellas variables suficientes para describir su estado sin necesidad de hacer referencia a su historia previa. Para el caso de suelos normalmente consolidados de acuerdo con Henkel (1960), Poorooshab (1961) y Holubec (1966) son suficientes como parámetros de estado: el índice de poros o contenido de humedad, y el estado de esfuerzos. Para el caso de los suelos parcialmente saturados, se deberá añadir el grado de saturación y la estructura del suelo. Brackley (1973) afirma que el comportamiento del suelo puede ser definido por la carga exterior, el índice de poros, la succión y la humedad.

Fredlund (1979) utiliza como parámetros de estado el índice de poros, la humedad y el estado de esfuerzo del suelo (se pueden escoger dos variables cualquiera entre el grado de saturación, la humedad o el índice de poros pues están relacionadas). Fredlund (1987) utiliza la mecánica del medio continuo, dentro de un contexto termodinámico para definir los parámetros de estado. De acuerdo con el mismo, la selección de parámetros de estado puede estar condicionada con variables teóricamente justificadas, y con variables que puedan ser experimentalmente determinables, o bien con variables operacionales en la práctica y también con variables con características aceptables dentro de la definición de estado. El autor define “estado” como parámetro no material requerido para caracterizar un sistema; “parámetros de estado de esfuerzos”, como parámetros para la caracterización de condiciones de deformación de un suelo inicial; y “relaciones constitutivas”, como ecuaciones que expresan las relaciones entre parámetros de estado.

2.4.4 Funciones y superficies de estado

Las funciones de estado son definidas como aquellas que se pueden establecer entre parámetros de estado para determinado suelo. Por ejemplo, la posible relación entre el índice de poros y el estado de esfuerzo soportado, definirá una función de estado que permitirá conocer la situación del suelo (Josa, 1988). Matyas y Radhakrishna (1968) denominan funciones de estado aquellas funciones que relacionan las diferentes variables de estado entre sí. Una relación entre el esfuerzo efectivo y el índice de poros será una función de estado para el caso de suelos saturados y carga isótropa. En el caso de suelo no saturado será necesario utilizar dos funciones de estado; una, para índice de poros, y otra para el grado de saturación o humedad conforme las ecuaciones siguientes:

4 Para ensayos triaxiales:

$$e = f_1(p', q, (u_a - u_w, e_0, Sr_0)) \quad (2.11)$$

$$Sr = f_2(p', q, (u_a - u_w, e_0, Sr_0)) \quad (2.12)$$

Donde: e_0 y Sr_0 representan el estado inicial del suelo.

4 Para ensayos edométricos:

$$e = f_1(\omega, u_a - u_w, e_0, Sr_0) \quad (2.13)$$

$$Sr = f_2(\omega, u_a - u_w, e_0, Sr_0) \quad (2.14)$$

Donde: e_0 y Sr_0 representan el estado inicial del suelo.

Las funciones f_1 y f_2 dependen de las trayectorias de succión y carga seguidas; por tanto, no pueden considerarse como unívocas en el caso más general. La Fig. 2.25 presenta las superficies de estado del índice de poros y del grado de saturación para un suelo de baja plasticidad.

Las superficies de estado son las superficies que resultan de representaciones gráficas en un espacio tridimensional de relaciones entre el índice de poros, y el grado de saturación con succión y la carga referida a la presión de aire. La utilización de estas representaciones gráficas permite visualizar de forma clara y coherente el comportamiento del suelo frente a cambios de succión y carga. Las superficies de estado proporcionan una relación útil entre los esfuerzos significativos, la deformación y la saturación en el caso isótropo o sin deformación lateral. Los cambios de volumen medidos en ensayos edométricos o isótropos con succión controlada han sido representados en espacios $(e, \omega, u_a - u_w)$ por numerosos autores (Bishop y Blight, 1963; Burland, 1965; Fredlund, 1985).

Las superficies obtenidas no son únicas. Dependen marcadamente de las trayectorias de esfuerzos aplicadas a la muestra. Sin embargo, bajo trayectorias de imbibición (disminución de la succión) a esfuerzo de confinamiento diferentes, las superficies de estado son aparentemente únicas (Alonso, *et al*, 1987). Lloret y Alonso (1980, 1985) indicaron las expresiones para las superficies de estado del índice de poros y del grado de saturación indicadas en la Tabla 2.5. Los mismos autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- 4 La expresión 7 es adecuada para pequeños rangos de variación de la presión exterior
- 4 La expresión 8 es indicada para grandes variaciones de la presión exterior
- 4 Las expresiones 9 y 10 son las mejores para describir las superficies de estado

Alonso, *et al*, (1987) comentan que el empleo de las superficies de estado es útil para entender las variaciones de volumen en suelos no saturados, pero presentan algunas limitaciones importantes. Entre ellas, la falta de unicidad en la respuesta de los suelos frente a determinadas trayectorias de esfuerzos.

2.5 Modelo elastoplástico de Barcelona

2.5.1 Generalidades de los modelos elastoplásticos

El uso de un modelo elastoplástico en mecánica de suelos ha sido apropiado para reproducir el comportamiento del suelo en procesos independientes del tiempo. En un modelo elástico, la respuesta es reversible y no depende de la trayectoria seguida. Por otro lado, las deformaciones en un modelo plástico son irreversibles, y dependen de la trayectoria. Para describir el comportamiento de los materiales en los que se observan deformaciones irrecuperables, fenómenos de fluencia y dilatancia inducida por esfuerzos de corte, es necesario aplicar la teoría de la plasticidad.

Tabla 2.5 Expresiones propuestas para las superficies de estado del índice de poros, y del grado de saturación (Loret y Alonso, 1995)

Número	Expresión
1	e $= a + b (\omega - u_a) + c(u_a - u_w)$ S_r
2	e $= a + b \log (\omega - u_a) + c(u_a - u_w)$ S_r
3	e $= a + b (\omega - u_a) + c \log (u_a - u_w)$ S_r
4	e $= a + b \log (\omega - u_a) + c \log (u_a - u_w)$ S_r
5	e $= a + b (\omega - u_a) + c(u_a - u_w) + d(\omega - u_a)(u_a - u_w)$ S_r
6	e $= a + b \log (\omega - u_a) + c(u_a - u_w) + d \log (\omega - u_a)(u_a - u_w)$ S_r
7	e $= a + b(\omega - u_a) + c \log (u_a - u_w) + d(\omega - u_a) \log (u_a - u_w)$ S_r
8	e $= a + b \log (\omega - u_a) + c \log (u_a - u_w) + d \log (\omega - u_a) \log (u_a - u_w)$ S_r
9	$S_r = a - th (b(u_a - u_w)(c + d(\omega - u_a)))$
10	$S_r = a - (1 - \exp(-b(u_a - u_w)))(c + d(\omega - u_a))$

El estudio de la teoría de la plasticidad comenzó con los trabajos de Coulomb (1776) y Rankine (1857) para analizar las presiones de tierra. Una perspectiva general de la evolución de los métodos elastoplásticos puede encontrarse en Gens y Potts (1987), mencionado por Yuk (1994).

Un modelo elastoplástico se define con la formulación de un criterio límite de discontinuidad, la aplicación del principio de actividad de deformaciones elásticas y plásticas, la definición de una regla de flujo generalizada, y el planteamiento de las reglas de rigidización.

Drucker y Prager (1952), y Ducker (1953) presentaron las primeras formulaciones plásticas para representar el comportamiento del suelo. Los primeros modelos de estado crítico se desarrollaron en la Universidad de Cambridge por Roscoe, *et al* (1958). Estos modelos permitieron reproducir los rasgos más característicos del comportamiento de los suelos desde el punto de vista cualitativo, y también como base para obtener modelos más completos, capaces de predecir el comportamiento de los suelos.

Generalidades de los modelos elastoplásticos

Las formulaciones que definen el comportamiento elastoplástico son:

- 4 Límite de dominio elástico (superficie de fluencia)
- 4 Principio de aditividad
- 4 Regla de flujo generalizada (leyes de fluencia)
- 4 Reglas de rigidización (leyes de rigidización)

El límite que divide la zona elástica de la zona plástica se define a partir de una función escalar f , establecida en el espacio de esfuerzos, llamada *función o superficie de fluencia*, que permite definir durante el proceso de carga, la evolución de las fronteras del dominio elástico dentro del espacio de esfuerzos y también el comienzo del proceso inelástico (Balmaceda, 1991). El criterio de *fluencia* está definido por una función “ f ”. La expresión que la define es la siguiente:

$$f = f(\omega_{ij}, \iota^k) \quad (2.15)$$

Donde:

- ι^k representa a un conjunto de variables internas en estado actual ($\kappa_{ij}^p, n_{ij}, c, d, \bar{\omega}$)
- κ_{ij}^p tensor de deformaciones plásticas
- c tensor de primer orden de endurecimiento plástico e isótropo
- n_{ij} tensor de endurecimiento plástico cinemático
- $d\bar{\omega}$ incremento temporal de trabajo específico

En la Fig. 2.26 representa un criterio de fluencia genérico en el espacio de esfuerzos principales. En cualquier trayectoria de esfuerzo en que $f < 0$, se desarrolla un proceso elástico donde sólo ocurren deformaciones recuperables. Cuando la trayectoria alcanza la superficie de fluencia, ésta se modifica y se transforma en la denominada superficie de carga plástica. El cambio en el dominio elástico puede resultar en un aumento (endurecimiento) o reducción del dominio (ablandamiento). Si f es función únicamente de ω_{ij} , la plasticidad es perfecta ($f(\omega)_{ij} = \text{cte}$), y el dominio elástico es invariable.

El principio de *aditividad* consiste en que la deformación total κ_{ij} es la suma de la componente elástica κ_{ij}^e y de la plástica κ_{ij}^p , y se expresa como:

$$\kappa_{ij}^p \mid \kappa_{ij}^e \geq 2 \kappa_{ij}^p \quad (2.16)$$

Para definir una regla de flujo *generalizada* en caso de que el incremento de deformación plástica pueda expresarse como una variable interna, es necesario que la regla de evolución tenga la siguiente forma:

$$d\kappa_{ij}^p \mid \sigma \hat{r}_{ij} \quad (2.17)$$

La cual establece la proporcionalidad entre las componentes de $d\kappa_{ij}^p$ y del tensor de flujo r_{ij} , que puede derivar de un potencial plástico, g , en el espacio de esfuerzo, ω_{ij} , por medio de un escalar, σ , no negativo, definido como parámetro de consistencia plástica.

Cuando la superficie de fluencia plástica se adopta como una función de potencial plástico, se dice que la plasticidad es asociada y ($g = \Sigma f$), y en ese caso:

$$d\kappa_{ij}^p \mid \sigma \hat{f}_{ij} \quad (2.18)$$

Donde:

$$f_{ij} \mid \frac{\epsilon f / \omega_{kl}, \iota_k}{\epsilon \omega_{ij}} \quad (2.19)$$

El incremento de deformación plástica se queda como:

$$d\kappa_{ij}^p \mid \sigma \left(\frac{\epsilon f / \omega_{kl}, \iota_k}{\epsilon \omega_{ij}} \right) \quad (2.20)$$

En caso de plasticidad no perfecta existe una ley de rigidización que relaciona ι_k con las deformaciones plásticas. El valor, ι_k , define la situación del dominio elástico. Esta ley asocia las deformaciones plásticas con las trayectorias seguidas.

Los conceptos básicos necesarios para desarrollar un modelo dentro de la teoría de la plasticidad se resumen en tres puntos fundamentales:

- a) Elección de la superficie de fluencia: $f(\omega_{ij}, \iota_k) = 0$
- b) Elección de la ley de fluencia: $d\kappa_{ij}^p \mid \sigma \hat{r}_{ij}$
- c) Elección de una ley de rigidización: $\iota_k \mid \iota_k / \kappa_{ij}^p$

El criterio de rotura se define mediante una expresión de tipo:

$$h(\omega_{ij}, \iota_k) = 0 \quad (2.21)$$

Esta ecuación representa un dominio en el espacio de esfuerzo, ω_{ij} , que incluye todos los estados de esfuerzos admisibles por el suelo. En el caso de plasticidad perfecta h y f , coinciden. Si se trata de plasticidad no perfecta, h puede coincidir con f para alguna combinación de valores de las variables

internas. Cuando $h = 0$, el suelo ha llegado a su estado límite último. En general h representa un dominio exterior a f que no puede ser sobrepasado, de forma que todos los estados esfuerzos que hacen que $h > 0$ son inalcanzables por el suelo.

Generalidades de los modelos de estado crítico

Distintos autores desarrollaron formulaciones para obtener modelos de estado crítico en el caso de suelos saturados. Al respecto, pueden citarse como trabajos pioneros:

- ≠ El modelo de Ducker, *et al* (1957) en el que se define una superficie controlada por el cambio de volumen (cap model)
- ≠ Roscoe, *et al* (1958) definieron un comportamiento dentro del concepto de estado crítico
- ≠ Calladine (1963) adoptó la teoría de plasticidad con rigidización

Los conceptos de estado crítico sirvieron de base para el desarrollo de modelos más complejos como modelo Granta-Gravel y el Cam-Clay (Roscoe y Schofield, 1963, y Schofield y Wroth, 1968); y también el Cam-Clay modificado (Roscoe y Burland, 1968). Por otro lado, estos modelos permitieron utilizar con éxito la teoría de la plasticidad para modelar el comportamiento mecánico de los suelos saturados.

Cam-Clay fue primero de los modelos propuestos y hasta hoy sigue siendo un punto necesario de referencia. Fue inicialmente desarrollado para arcillas normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas; adopta formulaciones relativamente sencillas, y sus predicciones son adecuadas en algunos casos. Las formulaciones de estado crítico establecen una relación entre el volumen específico (v), el esfuerzo esférico efectivo (p'), y el esfuerzo de corte (q) (Fig. 2.27) tal que:

$$v = B - \zeta \ln p' \quad (2.22)$$

$$q = M p' \quad (2.23)$$

Donde :

M , B y ζ son los parámetros del terreno, o sea:

M la pendiente de la recta de estado crítico

B el valor de v cuando $p' = 1$

ζ la pendiente de la recta en el espacio ($v, \ln p'$) en estado crítico

p' esfuerzo esférico en presiones efectivas

q el esfuerzo de corte o $q = (\omega_1 - \omega_3)$

2.5.2 Modelo elastoplástico de Barcelona (BBM)

El grupo de investigadores del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Barcelona han realizado estudios sobre el comportamiento de suelos no saturados con la finalidad de desarrollar un modelo elastoplástico de estado crítico para suelos no saturados. Josa, Alonso, Lloret y Gens (1987) realizaron una serie de ensayos de consolidación isótropa para examinar el comportamiento elastoplástico de un suelo no saturado. Alonso, Gens y Hight (1987) y Gens, Alonso y Josa (1989) expresaron cualitativamente el comportamiento elastoplástico de suelos no saturados.

Alonso, Gens, y Josa (1990) presentaron una formulación matemática de un modelo elastoplástico validando el concepto teórico con datos experimentales.

El modelo básico de Barcelona (*Barcelona Basic Model: BBM*) está formulado con base en la teoría de la plasticidad rigidizable; se compone de unas superficies de fluencia, ley de fluencia (deformaciones plásticas), y ley de rigidización (deformaciones elásticas).

Un espacio de esfuerzos apropiado para describir el comportamiento para suelos no saturados en un estado isótropo, es el espacio (s, p) ; donde $p = \frac{\omega_1 + 2\omega_3}{3} u_a + \omega_m u_a$ (esfuerzo medio neto), ω_m es exceso del esfuerzo medio sobre la presión de aire, y s es la succión.

En forma paralela al comportamiento de los suelos saturados sometidos a incrementos del esfuerzo, p , en la curva noval para una succión determinada y constante, el cambio de volumen específico propuesto resultó ser:

$$v = N(s) + \zeta(s) \ln \frac{p}{p^c} \quad (2.24)$$

Donde p^c es una presión de referencia para la que $v = N(s)$. $\zeta(s)$ fue considerada dependiente de la succión, de manera que al aumentar ésta el suelo se comportaba con mayor rigidez en los intervalos de esfuerzos utilizados.

En las ramas de descarga y recarga a succión constante, el comportamiento del suelo (considerado elástico) se planteó a partir de la relación:

$$dv = \rho \frac{dp}{p} \quad (2.25)$$

La pendiente, ρ , de las rectas de descarga y recarga fue considerada independiente de la succión, e igual a una constante para asegurar que el modelo resultara conservador.

La Fig. 2.28 presenta de acuerdo con el modelo, la respuesta de dos muestras de un mismo suelo sometido a succiones diferentes ($s = 0$ y $s = \text{cte.}$) en trayectorias de esfuerzos isótropos en la que varía p . Para el suelo saturado, la presión de preconsolidación es p_0^* , y para el suelo no saturado la presión para la que comienzan a producirse las deformaciones permanentes, es p_0 . La relación genérica entre p_0 y p_0^* en el espacio (s, p) se obtuvo relacionando el volumen específico, v , en los puntos **1** y **3**, en una trayectoria **1:2:3** de forma tal que:

$$v_1 + 2v_p + v_s = v_3 \quad (2.26)$$

La expansión recuperable que se produce en el tramo **2:3** se definió a partir de la expresión:

$$dv = 4\rho_s \frac{ds}{s^2 p_{atm}} \quad (2.27)$$

Donde ρ_s es la pendiente de la recta que relaciona v_s , y $\ln(s + p_{atm})$ es una rama de descarga y recarga. La presión atmosférica, p_{atm} , se incorporó para evitar que valores muy bajos de la succión, dv o v tendieran a infinito.

A partir de las ecuaciones 2.24, 2.25, 2.26 y 2.27 se obtiene:

$$N(s) \zeta(s) \ln \frac{p_0}{p^c} - 2\rho \ln \frac{p_0}{p_0^*} - 2\rho_s \ln \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} = N(0) \zeta(0) \ln \frac{p_0}{p^c} \quad (2.28)$$

Que es una relación entre p_0 y s , función de unos parámetros de referencia (p_0^* , p^c), y de otros parámetros del suelo ($N(s)$, $\zeta(s)$, ρ , ρ_s). $N(0)$ y $\zeta(0)$ son los valores de $N(s)$ y $\zeta(s)$ para suelos saturados. Si se admite que p^c es la presión para la que se alcanza la curva noval saturada, partiendo de un estado no saturado en una trayectoria de reducción de la succión que solamente genera expansión elástica, se cumple que:

$$\frac{v}{p^c} = N(0) - N(s) - \rho_s \ln \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \quad (2.29)$$

De tal forma que la ecuación 2.28 se puede simplificar de la siguiente manera:

$$\left(\frac{p_0}{p^c} \right)^{2\rho} \left(\frac{p_0}{p^c} \right)^{2\rho_s} = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{2\rho} \left(\frac{p_0}{p^c} \right)^{2\rho_s} \frac{\Psi(s, 4\rho\beta)}{\Psi(0, 4\rho\beta)} \quad (2.30)$$

Esta ecuación define en el espacio (s , p) una *superficie de fluencia* (Fig. 2.29) cuya posición queda determinada por la presión de preconsolidación del suelo saturado, p_0^* , que es un parámetro de rigidización del modelo. Si $p_0^* = p^c$, $p_0 = p^c$ la superficie de fluencia, p_0 , se transforma en una recta vertical.

Para tener en cuenta los posibles cambios de rigidez del suelo con los aumentos de la succión, Josa (1988) adoptó la siguiente expresión:

$$\zeta(s) = \zeta(0) \Psi(4r) \exp(-4\eta s / 2r\beta) \quad (2.31)$$

Donde r es una constante relacionada con la máxima rigidez del suelo para succión infinita, η es un parámetro que controla la velocidad con que varía $\zeta(s)$ con la succión.

Josa (1988) adoptó un valor de la succión, $s_0(p)$, considerado como el más elevado al que había estado sometido el suelo en toda su historia para cada esfuerzo esférico, de manera tal que cuando la succión aplicada al suelo alcanza este valor, aparecen deformaciones aparentes. $s_0(p)$ es una nueva superficie de fluencia del suelo, considerada como constante en una primera aproximación. Plantea además una

relación logarítmica entre el volumen específico, v , y la succión, s , tanto en las ramas noales como en las ramas de descarga y recarga (ciclos de secado y humedecimiento). El cambio de volumen específico, dv , en la rama noal tiene la siguiente expresión:

$$dv \Big| 4\zeta_s \frac{ds}{s \cdot 2 p_{atm} \theta} \quad (2.32)$$

y en la rama de descarga y recarga está expresada por la ecuación 2.27. De acuerdo con la ecuación 2.25, un aumento de p dentro del dominio elástico, causará un incremento de deformación volumétrica:

$$d\kappa_{vp}^e \Big| 4 \frac{dv}{v} \Big| \frac{\rho}{v} \frac{dp}{p} \quad (2.33)$$

Cuando p alcanza la superficie de fluencia, p_0 , el incremento de deformación volumétrica total se obtiene de la ecuación 2.24 y se expresa como:

$$d\kappa_{vp} \Big| \frac{\zeta/s \theta dp_0}{v p_0} \quad (2.34)$$

Tal que el incremento de deformación volumétrica plástica $d\kappa_{vp}^p$, tiene la expresión:

$$d\kappa_{vp}^p \Big| \frac{\zeta/s \theta 4 \rho}{v p_0} dp_0 \quad (2.35)$$

Se puede demostrar tomando en cuenta la ecuación 2.29 que el incremento de deformación volumétrica plástica, se puede expresar también como:

$$d\kappa_{vp}^p \Big| \frac{\zeta/s \theta 4 \rho}{v p_0^*} dp_0^* \quad (2.36)$$

De manera similar, de acuerdo con la ecuación 2.27 un aumento de la succión dentro del campo elástico, genera un incremento de deformación volumétrica elástica cuya expresión es:

$$d\kappa_{vs}^e \Big| \frac{\rho_s}{v} \frac{ds}{s \cdot 2 p_{atm} \theta} \quad (2.37)$$

y si alcanza la superficie de fluencia, s_0 , se producirán deformaciones plásticas cuyos incrementos serán:

$$d\kappa_{vs}^p \Big| \frac{\zeta_s \cdot 4 \rho_s}{v} \frac{ds_0}{s_0 \cdot 2 p_{atm} \theta} \quad (2.38)$$

De esta forma se controla la posición de la superficie de fluencia, p_0 y s_0 , que pueden moverse, en principio, independientemente una de la otra en el espacio de esfuerzos (s, p). Sin embargo, Josa (1988) hizo depender a ambas superficies de la deformación volumétrica plástica total $d\kappa_v^p$ | $d\kappa_{vp}^p$ 2 $d\kappa_{vs}^p$ 2 $d\kappa_{vh}^p$, de tal manera que las leyes de la rigidización tenían la forma:

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} \Big| \frac{v}{\zeta/004 \rho} d\kappa_v^p \tag{2.39}$$

$$\frac{ds_0}{s_0} \Big| \frac{v}{\zeta_s 4 \rho_s} d\kappa_v^p \tag{2.40}$$

El tercer parámetro de esfuerzo, $q = (\omega_1 - \omega_3)$, ha sido incorporado para incluir el efecto del esfuerzo de corte. El estado de deformación está definido por la deformación volumétrica $\kappa_v = (\kappa_1 + 2\kappa_3)$, y la deformación de corte $\kappa_s \Big| \frac{2}{3}/\kappa_1 4 \kappa_3 0$. Por consistencia, el modelo debe predecir comportamientos saturados cuando el valor de la succión se reduce a cero. Para una buena representación del comportamiento general del suelo no saturado tomando como base el modelo Cam-Clay, se propuso que una superficie para una muestra a una succión constante, s , que estará descrita por una elipse que presentará un esfuerzo de preconsolidación isótropa, dada por p_0 previamente definido, el cual se encuentra en la superficie LC (*Loading-Collapse*) (Fig. 2.30).

Para definir la elipse se necesita especificar el estado de falla. Paralelamente a las condiciones saturadas, una línea de estado crítico (CSL) para una succión diferente de cero representará el incremento de la resistencia inducida por la succión. Como una primera hipótesis, el efecto de la succión será representado por un incremento en la cohesión, manteniendo la pendiente M de la línea de estado crítico (CSL) para condiciones saturadas. Si el incremento en la cohesión sigue una relación lineal con la succión, las elipses interceptarán el eje p en un punto para el cual:

$$p = - p_s = - ks \tag{2.41}$$

Donde k es una constante.

El eje mayor de la elipse atravesará el segmento $- p_s(s)$ a $p_0(s)$, y su ecuación estará dada por:

$$q^2 4 M^2 /p 2 p_s 0/p_0 4 p_0 \Big| 0 \tag{2.42}$$

También se ha propuesto que la superficie geométrica, SI, se extiende dentro de la región $q > 0$ por medio de un plano paralelo al eje, q , de tal manera que la ecuación $s = s_0 = cte$, se mantiene en el espacio (p, q, s); una vista tridimensional de la superficie (p, q, s) se muestra en la Fig. 2.31.

Con respecto a la dirección de los incrementos de la deformación plástica, asociados con la superficie de campo (ec 2.42), se sugiere una regla de flujo no asociada en los planos $s = constante$.

De hecho, se sabe (Gens y Potts, 1982a) que el modelo de estado crítico convencional, a menudo subestima los valores de K_0 . Para evitar este problema la expresión para la regla de flujo asociada se modificó, introduciendo un parámetro ζ (Ohmaki, 1982) resultando la siguiente ecuación:

$$\frac{d\kappa_s^p}{d\kappa_{vp}^p} = \frac{2q\zeta}{M^2/2p_s + 4p_0} \quad (2.43)$$

Donde ζ se elige de tal manera que la regla de flujo prediga cero en deformación lateral para un estado de esfuerzo correspondiente a valores de K_0 (Jaky, 1948) ($K_0 = 1 - \sin \pi' = (6 - 2M)/(6 + M)$). Dada la relación entre K_0 y M , la nueva regla de flujo no introduce parámetros constitutivos adicionales. Las componentes de la deformación plástica asociadas a esta superficie de campo estarán dadas por $(d\kappa_{vp}^p, d\kappa_s^p)$. Para la segunda superficie de campo ($s = s_0 = \text{cte}$), el vector de incremento de la deformación plástica inducida por el incremento de succión será $(d\kappa_{vp}^p, 0)$, donde $d\kappa_{vp}^p$ está dado por la ecuación 2.38.

La deformación elástica $d\kappa_s^e = \frac{2}{3} \frac{dq}{d\kappa_1^e + d\kappa_3^e}$ inducida por cambios en q , será analizada a través del módulo de corte G :

$$d\kappa_s^e = \frac{dq}{3G} \quad (2.44)$$

El modelo BBM es capaz de reproducir un gran número de características de comportamientos mecánicos en suelos no saturados por ejemplo:

- 4 Incrementos del esfuerzo de preconsolidación aparente con incrementos de succión
- 4 Estado del suelo después de un colapso
- 4 Deformaciones irreversibles en algunas trayectorias de humedecimiento
- 4 Incrementos del esfuerzo de corte al incrementar la succión
- 4 La existencia de la línea de estado crítico (SCL) para valores de succión constante

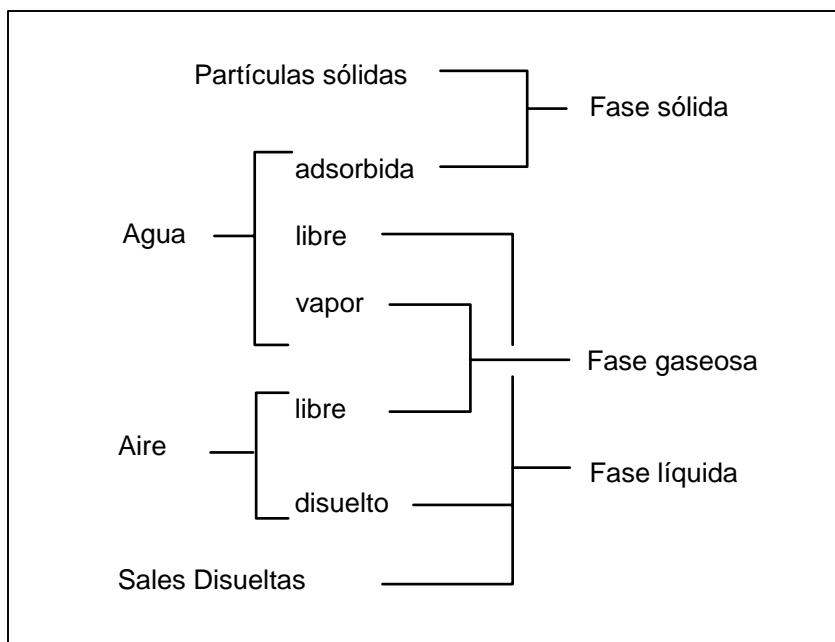


Figura 2.1 Componentes principales de cada una de las fases de un suelo no saturado (Yoshimi & Osterberg, 1963).

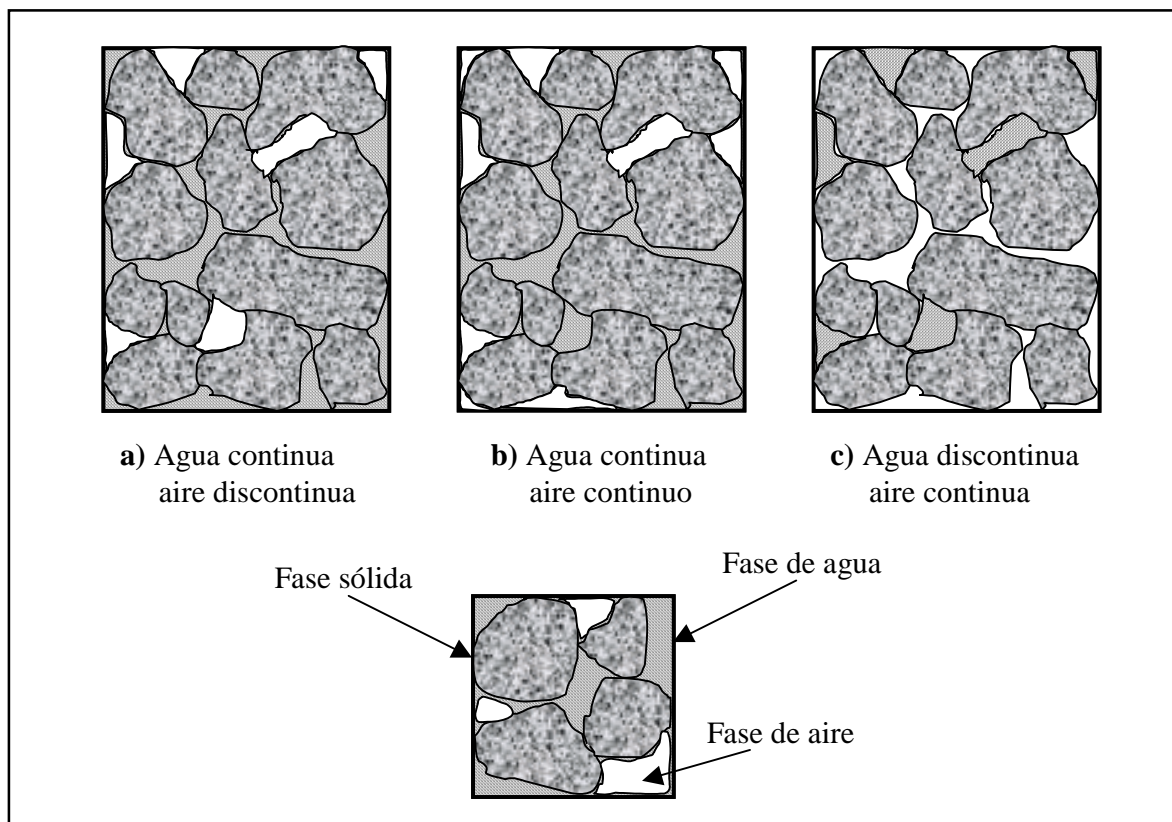


Figura 2.2 Estructura de suelos no saturados (Wroth & Houlby, 1985).

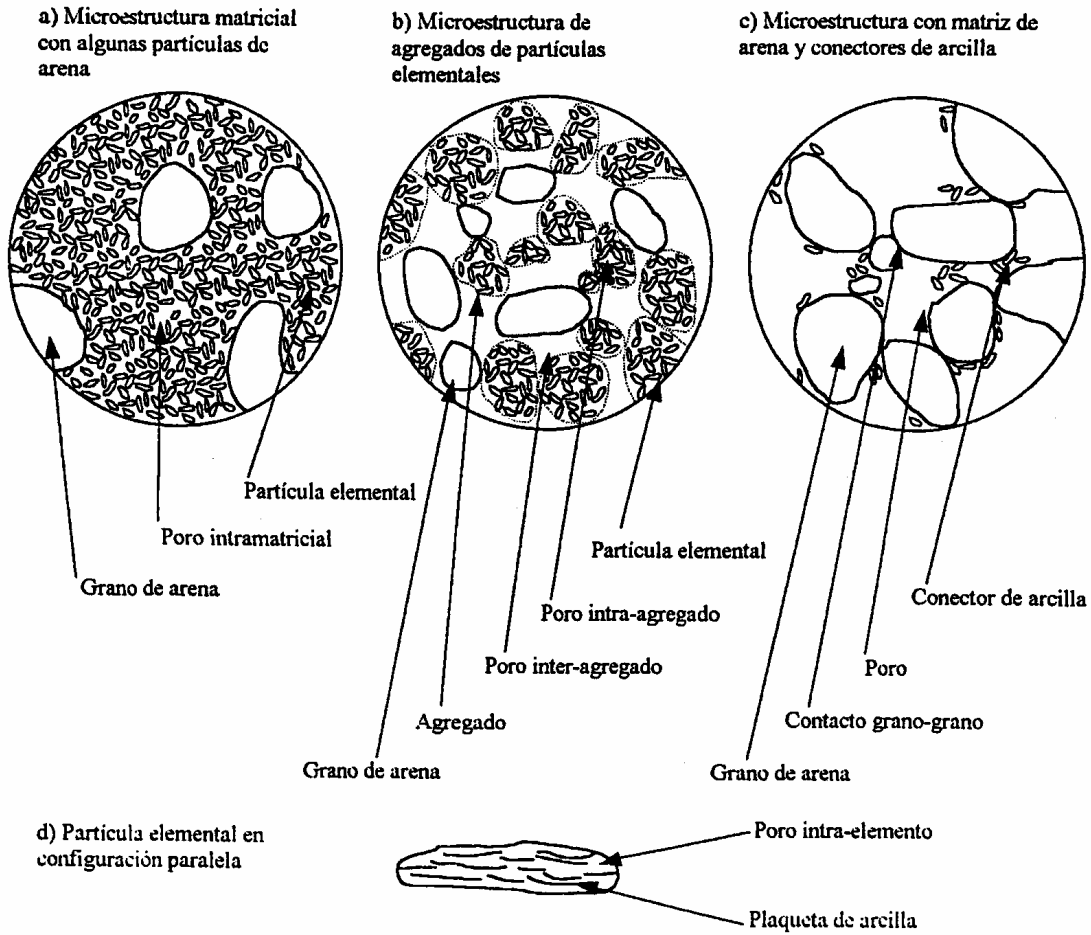


Figura 2.3 Estructura del suelo (Alonso, *et al*, 1987).

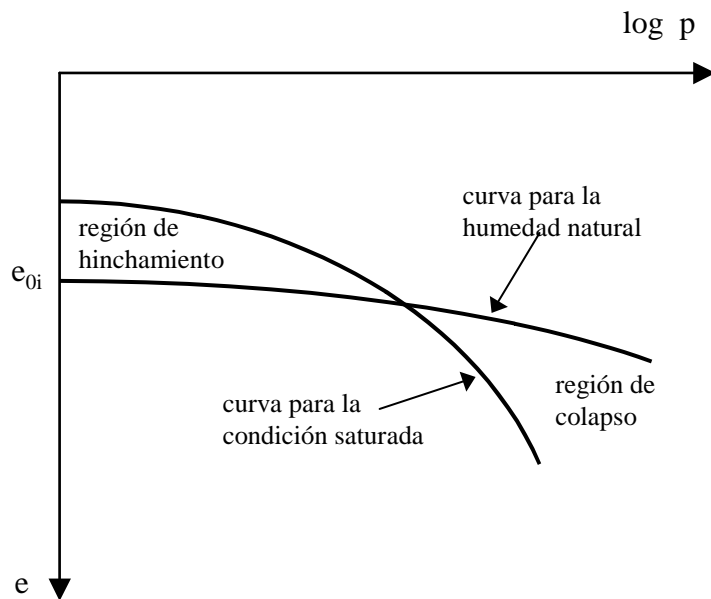


Figura 2.4 Hinchamiento y colapso para un mismo suelo (Jennings y Kenight, 1975).

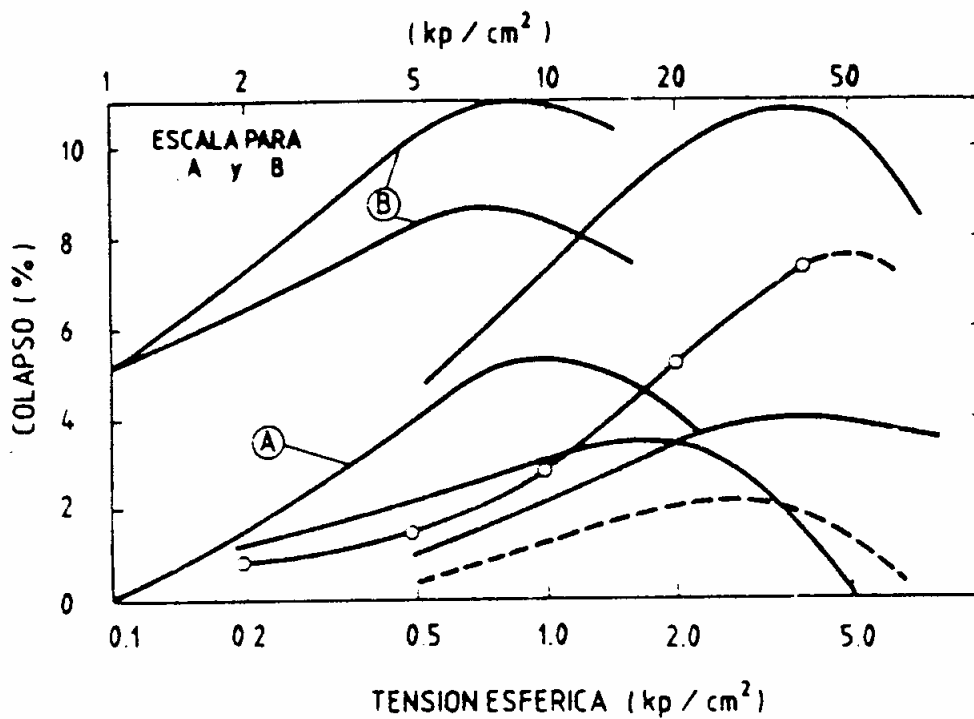


Figura 2.5 Máximo colapso, según Yudhbir (1982).

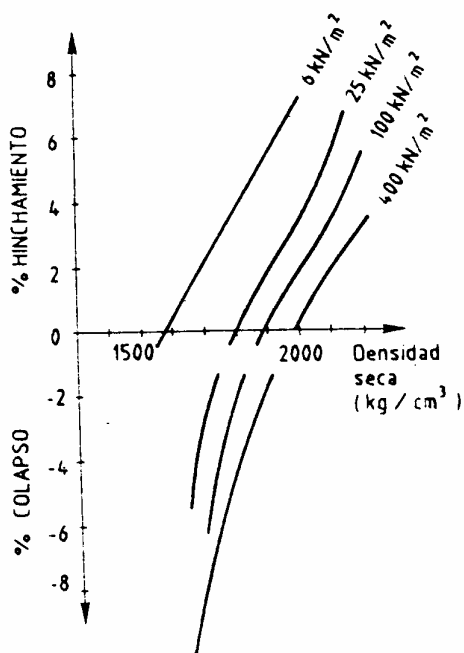


Figura 2.6 Variación del hinchamiento y del colapso con la densidad seca y presión aplicada, después de inundar (Cox, 1978).

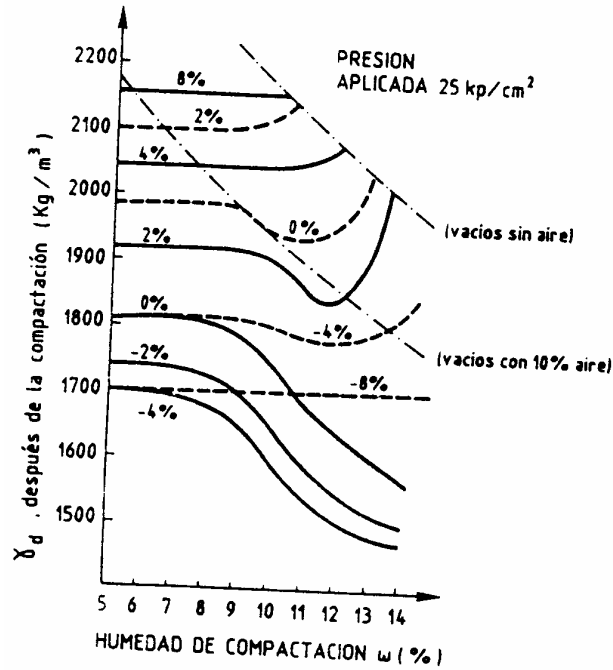


Figura 2.7 Variación del hinchamiento y del colapso después de inundar, con la humedad de compactación y densidad seca (Cox, 1978).

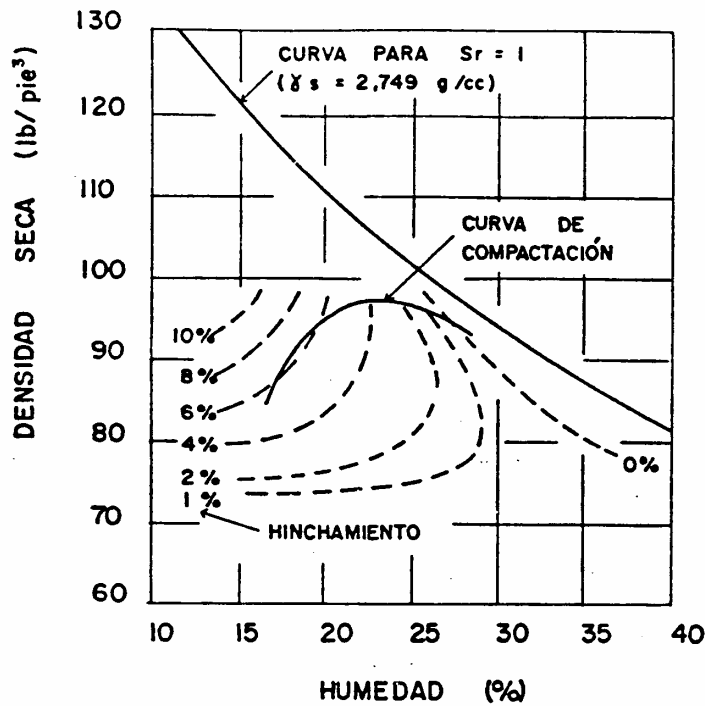


Figura 2.8 Hinchamiento en procesos de compactación al inundar, tras secar al aire (Holtz, 1959).

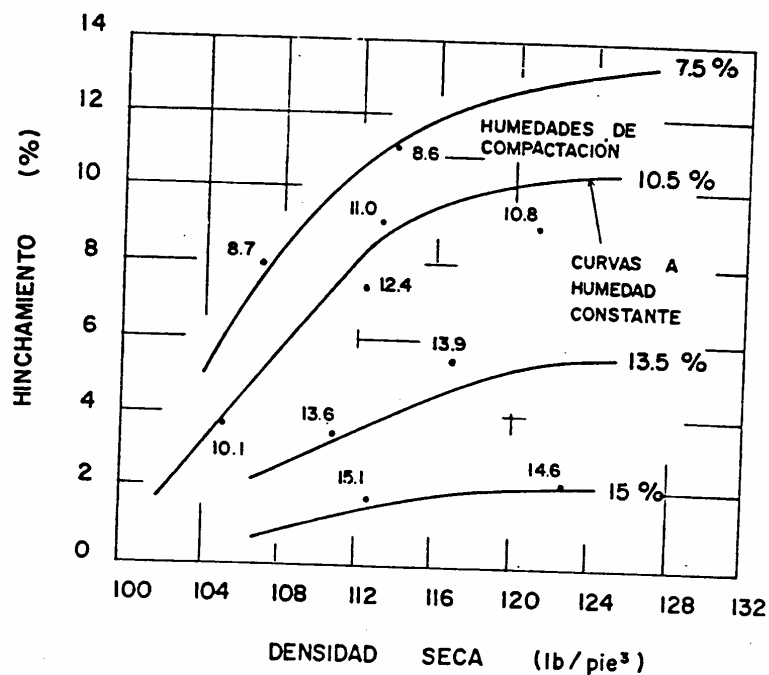


Figura 2.9 Variación del hinchamiento con la densidad seca al compactar a diferentes humedades (Gizieny y Lee, 1965).

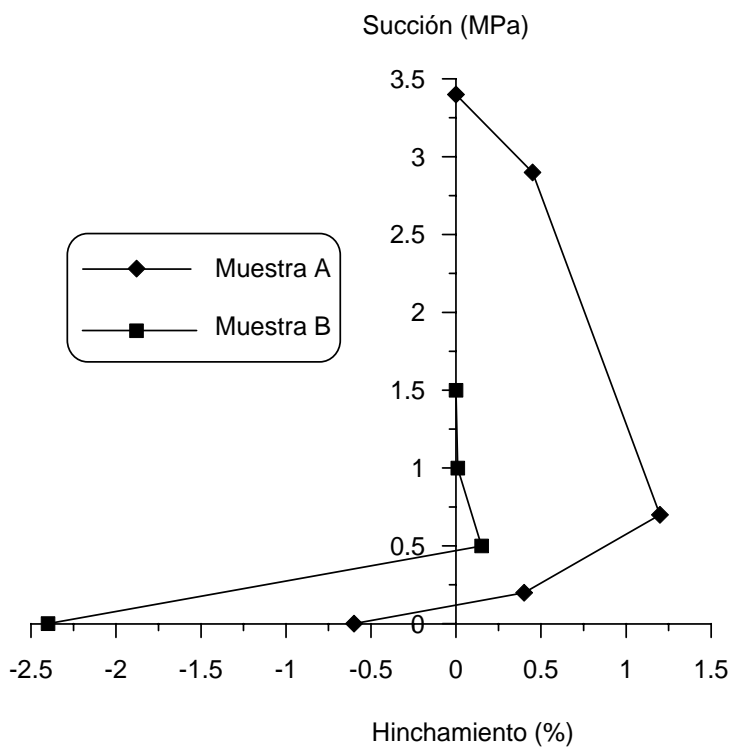


Figura 2.10 Expansión y colapso durante el humedecimiento de dos muestras compactadas (Escario y Sáez, 1973).

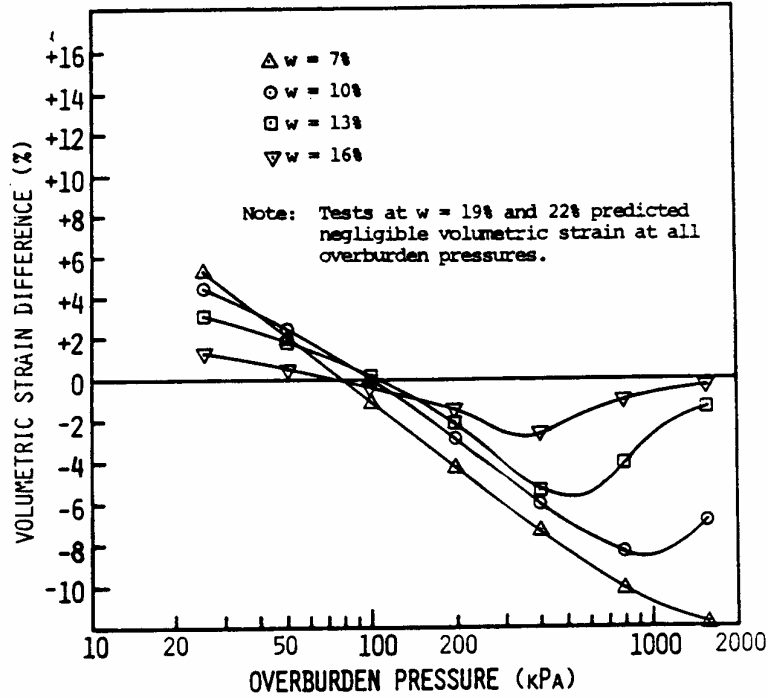


Figura 2.11 Efecto de la carga y del contenido de agua en la deformación volumétrica. Resultados obtenidos mediante ensayos de doble edómetro, con muestras compactadas mediante impactos al 80 % de compactación relativa (Lawton, *et al*, 1989).

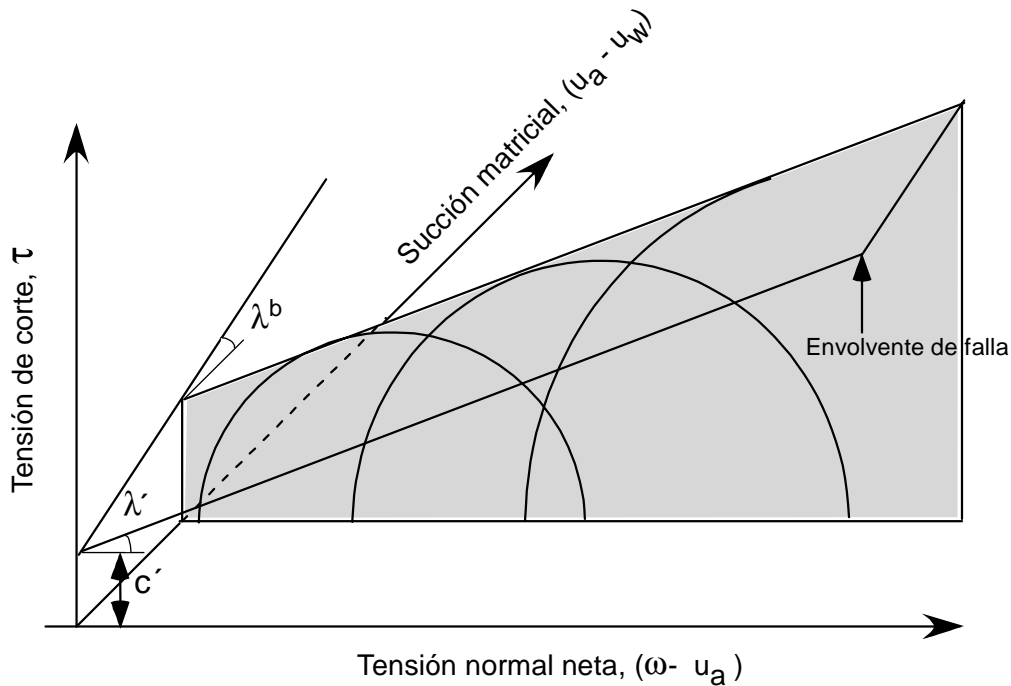


Figura 2.12 Extensión de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb (Fredlund, Morgenstern y Widger, 1978).

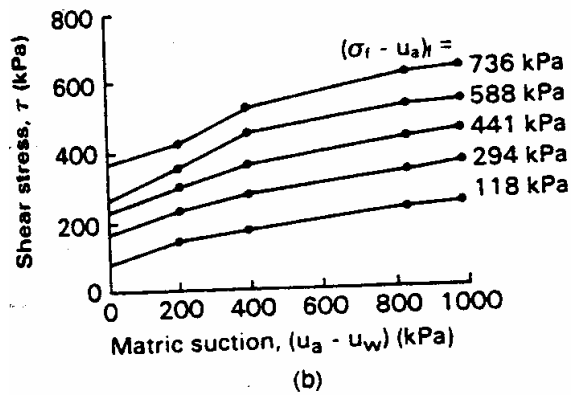
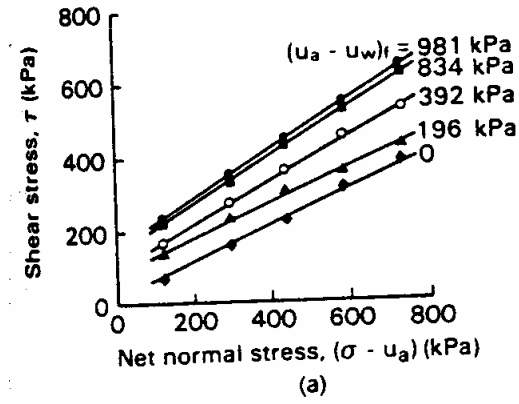


Figura 2.13 Resistencia a la falla & succión y esfuerzo normal neto para la arena arcillosa de Madrid (Escario y Sáez, 1986).

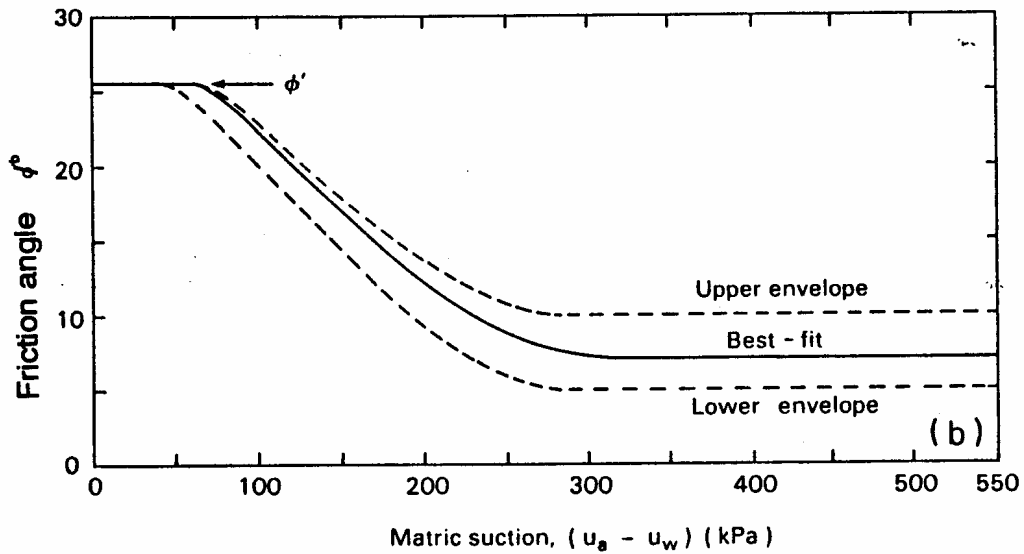


Figura 2.14 Valor de λ^b contra succión (Gan, Fredlund y Rahardjo, 1988).

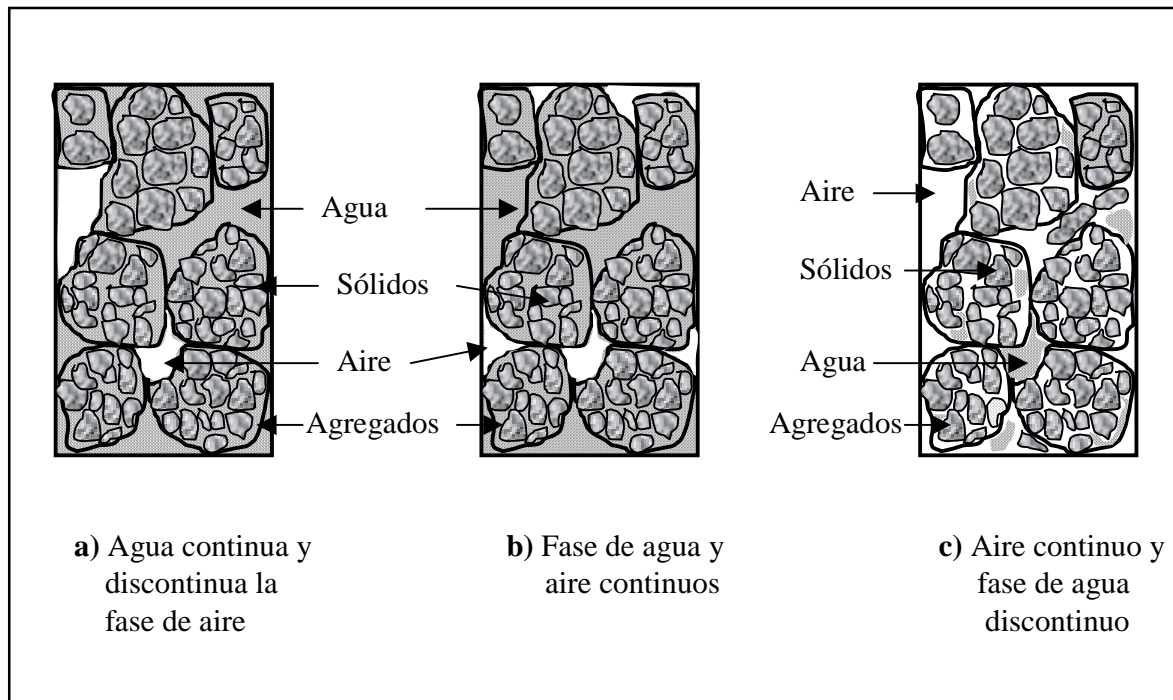


Figura 2.15 Estructuras de suelos compactados.

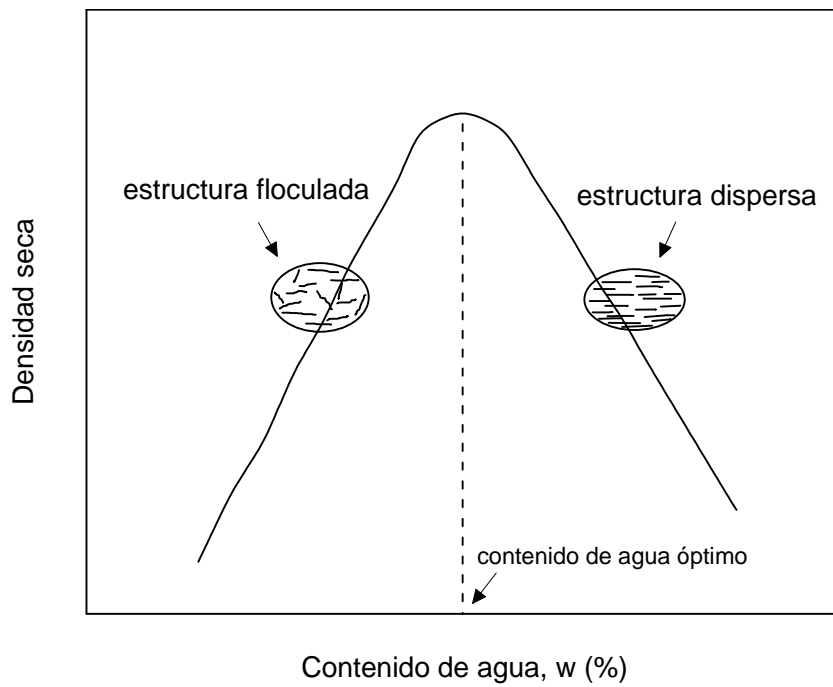


Figura 2.16 Efecto del contenido de agua sobre estructuras de suelos compactados (Lambe, 1958).

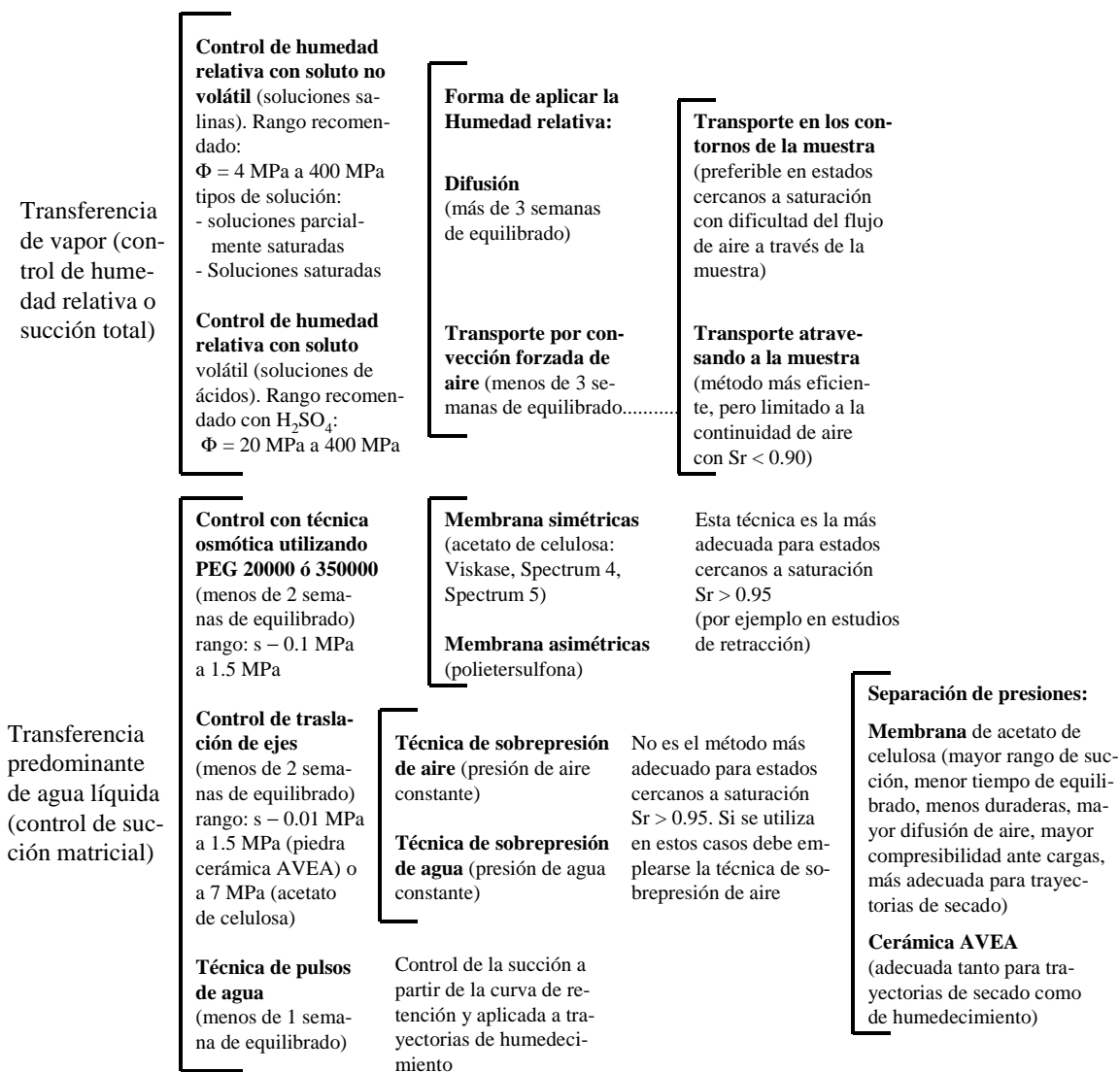


Figura 2.17 Técnicas experimentales de aplicación de succión. Rangos típicos de succión aplicada. Tiempos de equilibrado aproximados para suelos arcillosos con una distancia de drenaje de 10 mm (Gens y Romero, 2000).

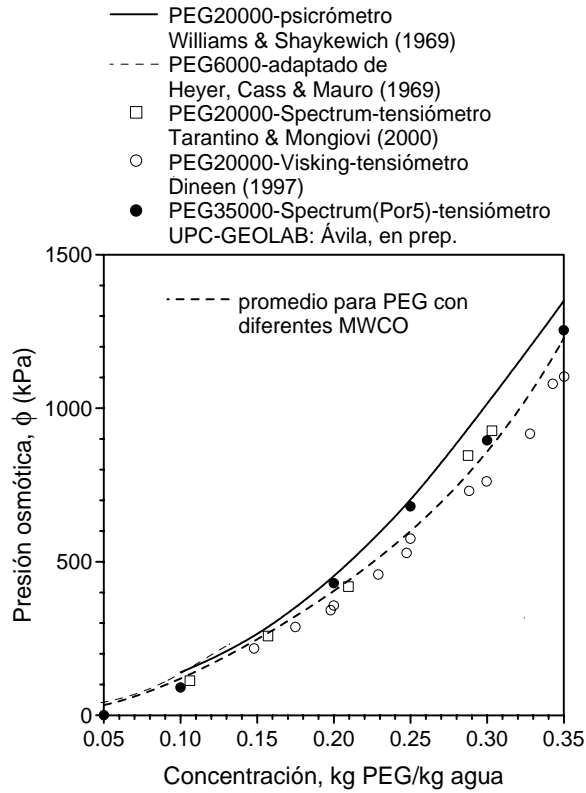


Figura 2.18 Calibración de la presión osmótica de soluciones de PEG, con diferentes masas moleculares (Gens y Romero, 2000).

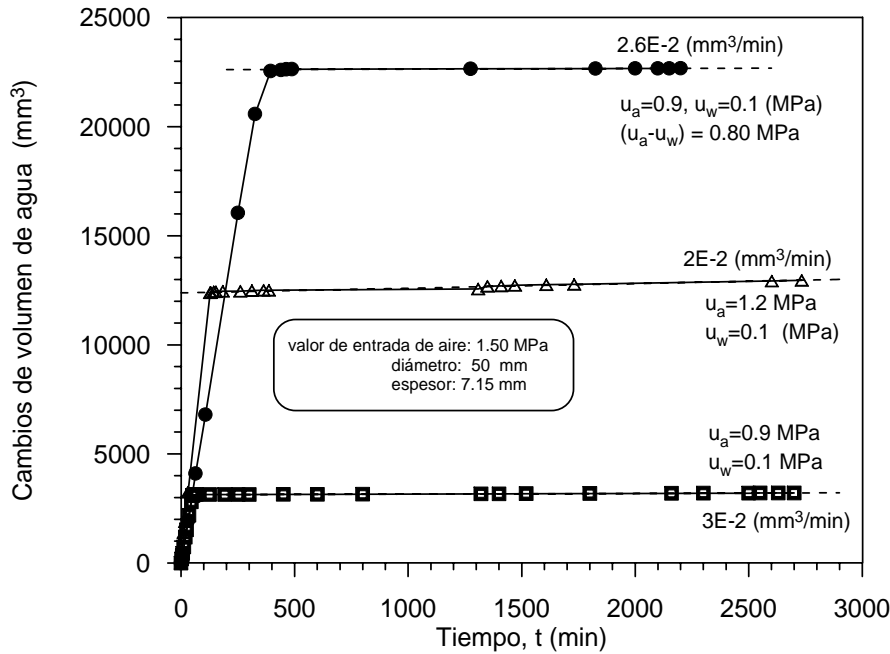


Figura 2.19 Aire disuelto a través del disco cerámico a diferentes condiciones de presión de aire (u_a) y agua (u_w). Nueva célula edométrica con control de succión.

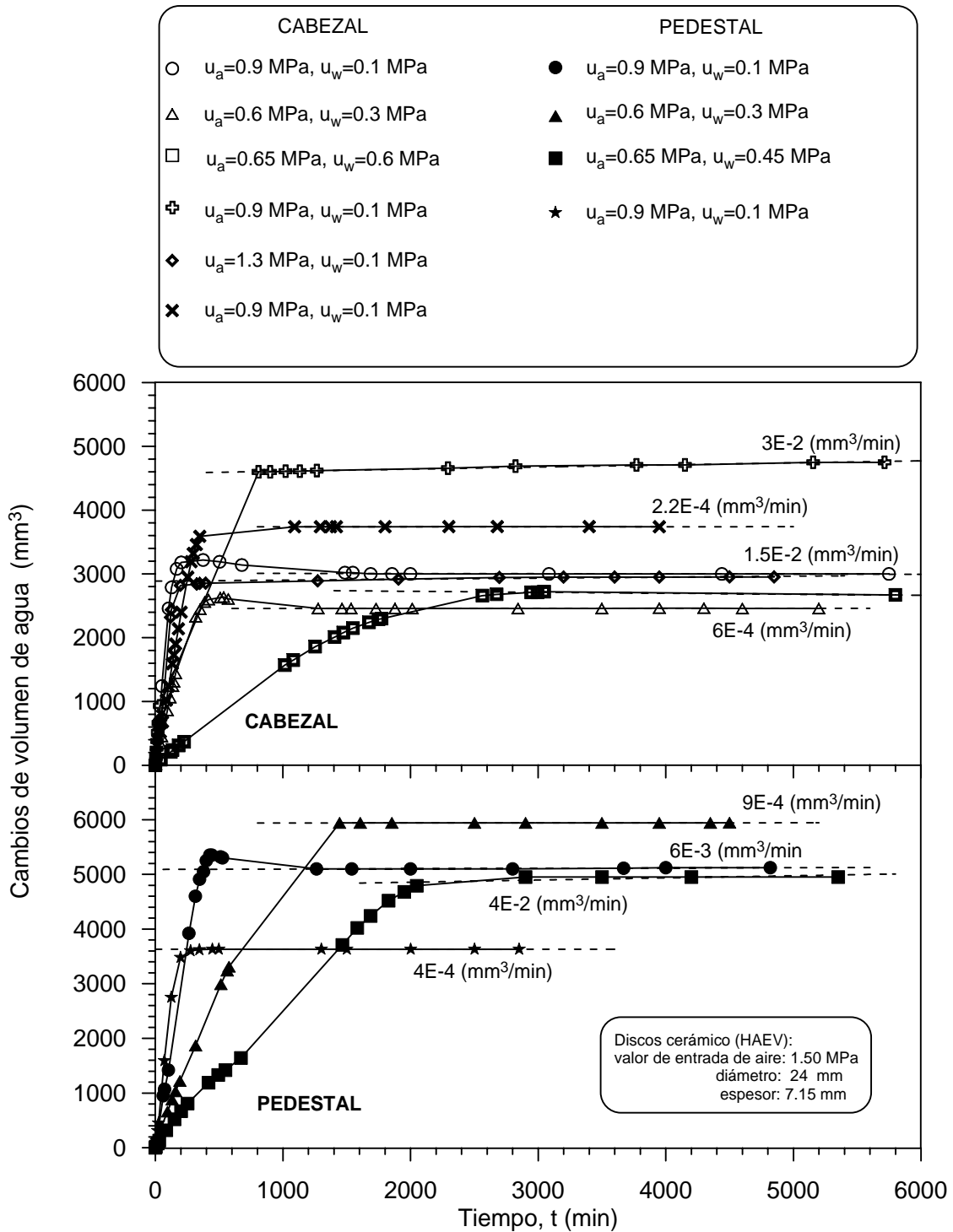


Figura 2.20 Aire disuelto a través del disco cerámico a diferentes condiciones de presión de aire u_a y agua u_w (Cámara Triaxial con succión controlada).

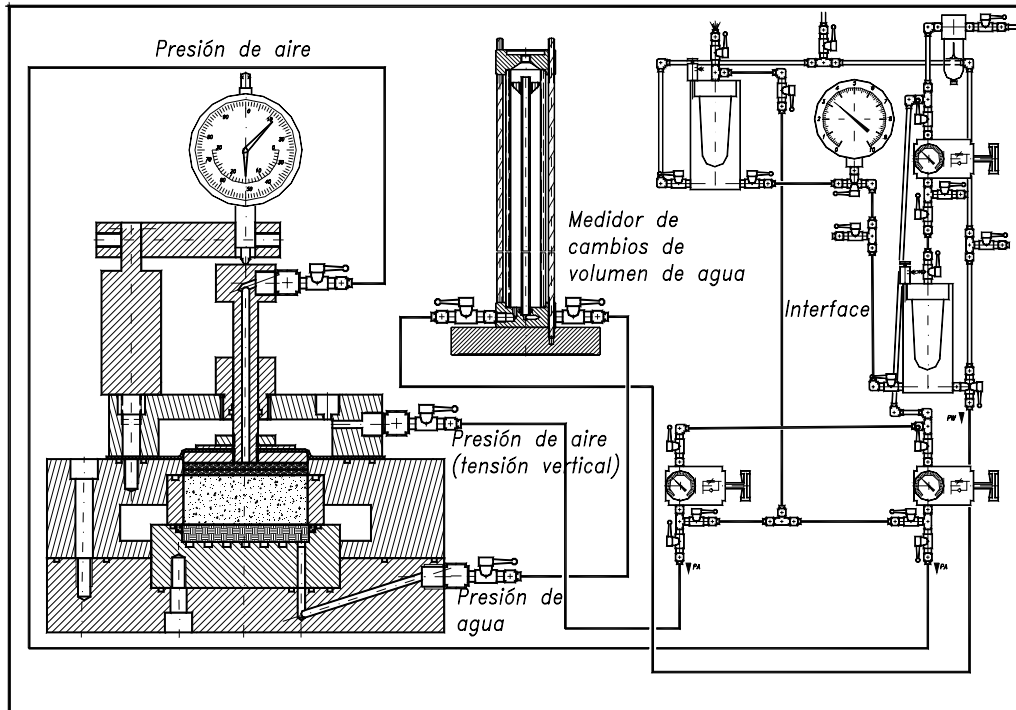


Figura 2.21 Edómetro con control de succión (Lloret, 1982). Célula edométrica, medidor de cambio de agua y sistema de presión; no están a la misma escala.

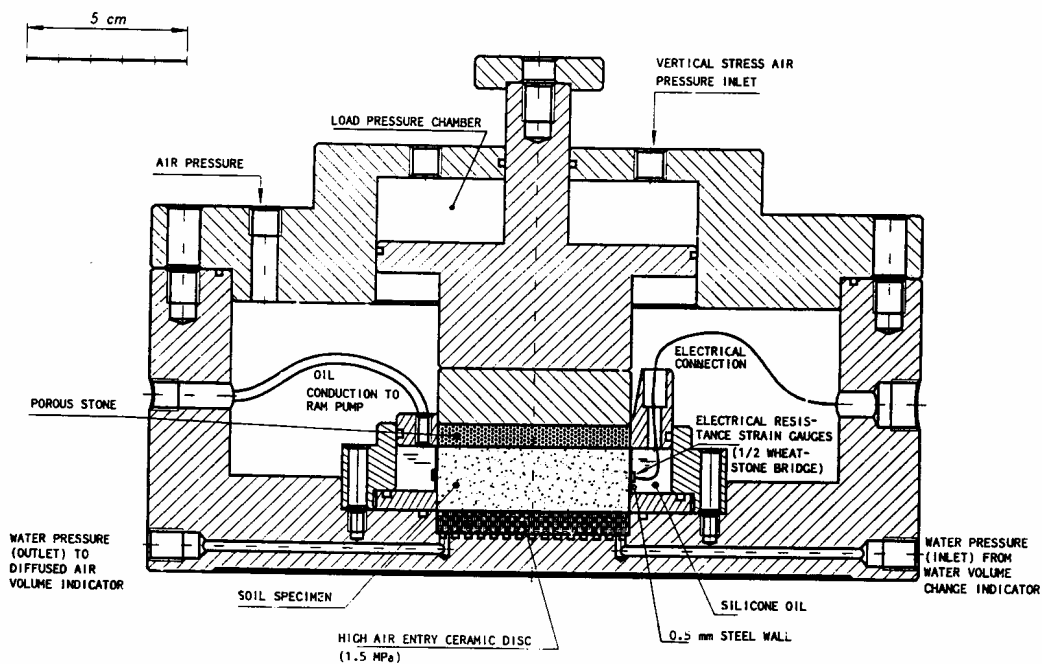


Figura 2.22 Célula edométrica con control de succión, y esfuerzo lateral (Romero, 1999).

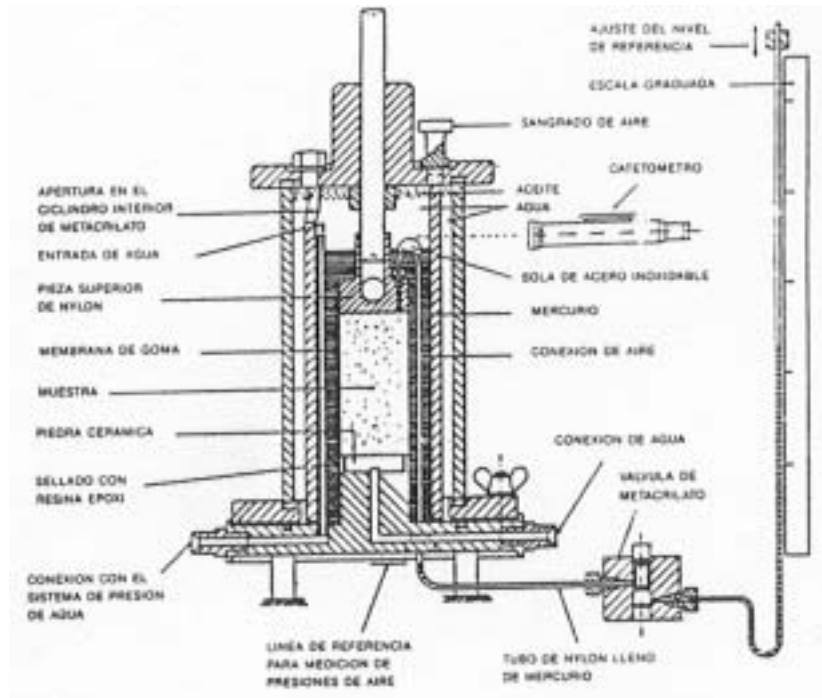


Figura 2.23 Célula triaxial modificada para ensayos en suelos parcialmente saturados (Bishop y Donald, 1961).

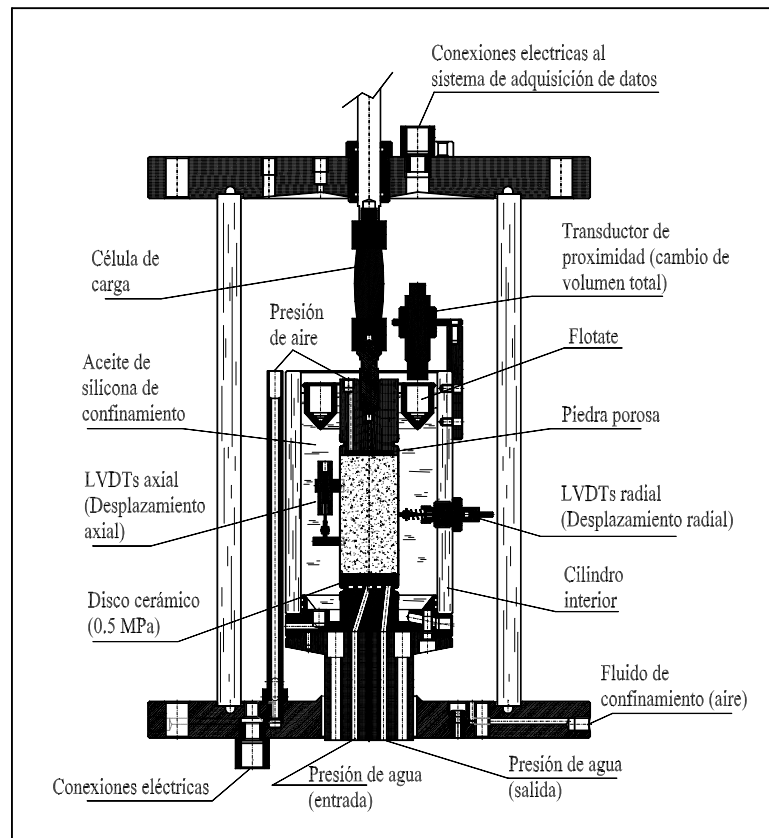


Figura 2.24 Célula triaxial para suelos no saturados (Carvalho, 2001).

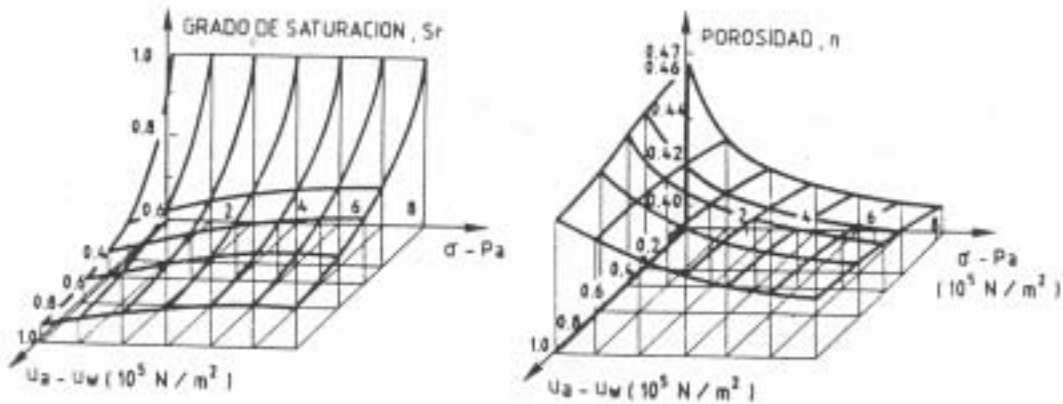


Figura 2.25 Superficies de estado para el índice de vacíos y grado de saturación (Matyas y Radakrishna, 1968).

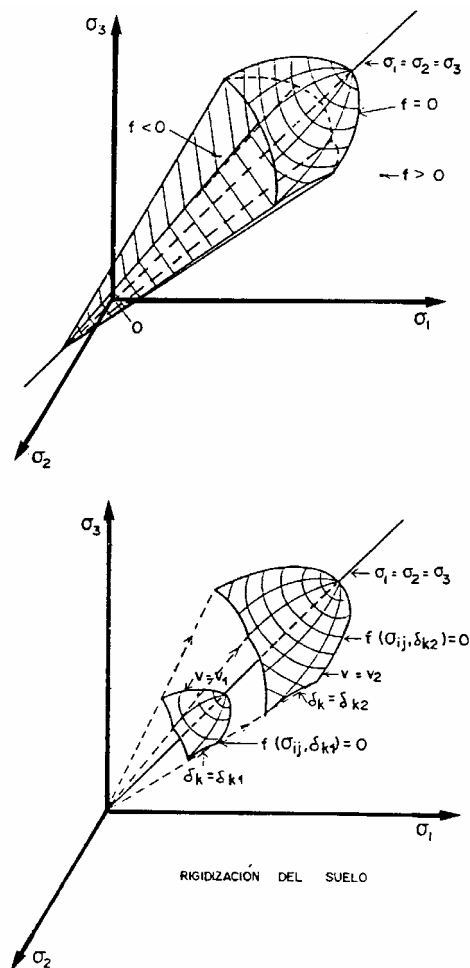


Figura 2.26 Representación de un criterio de falla genérico en el espacio de tensiones principales (citado por Josa, 1988). a) Reblandecimiento del suelo, b) rigidización y reblandecimiento del suelo y caso de plasticidad perfecta.

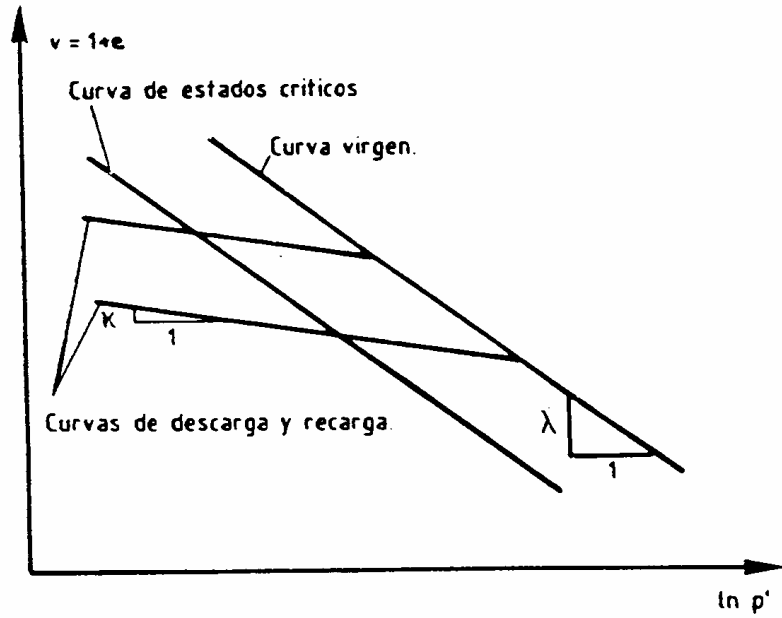


Figura 2.27 Modelo de estado crítico.

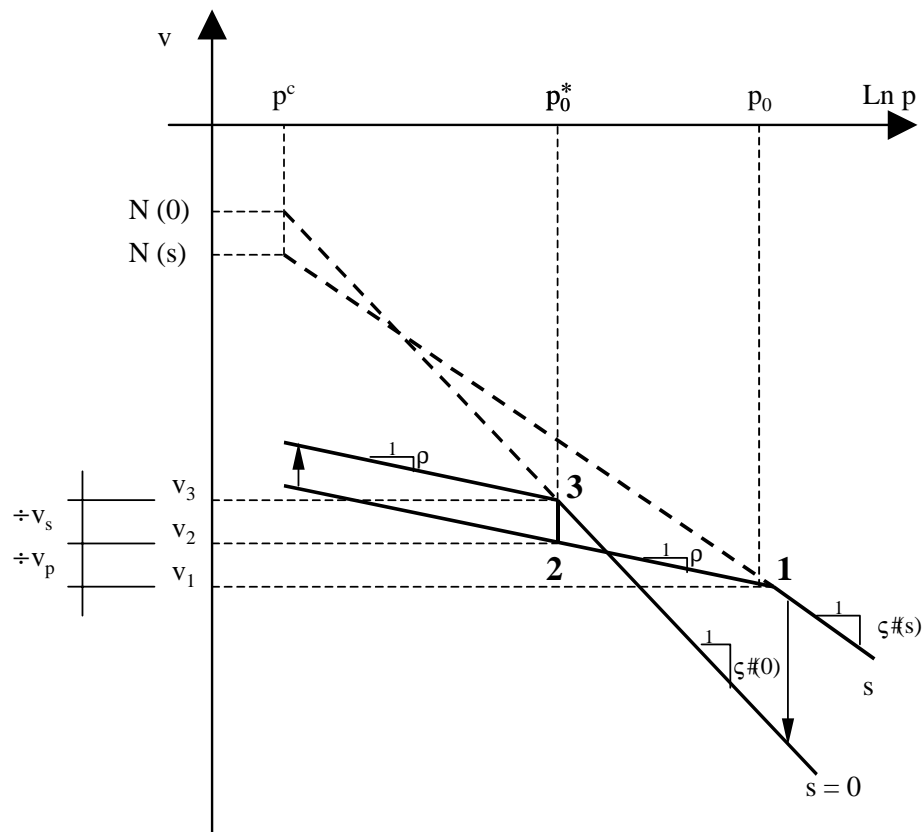


Figura 2.28 Variación del volumen específico, v , con p y s en curvas de carga y descarga según, Alonso *et al* (1990).

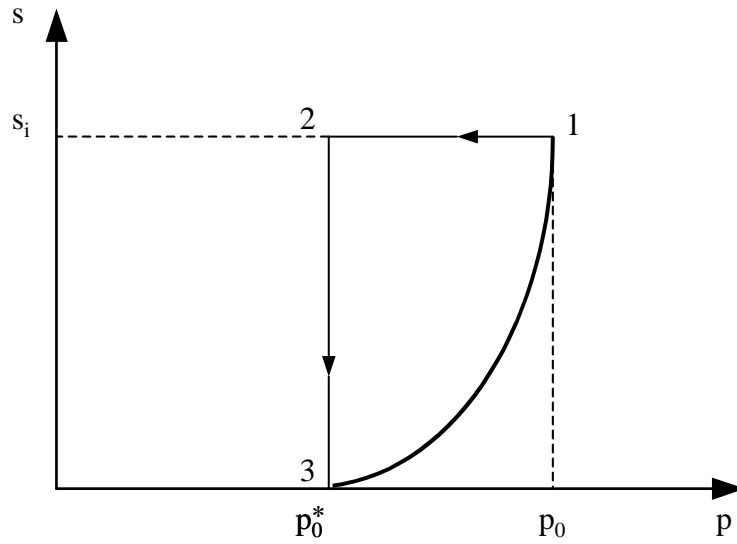


Figura 2.29 Superficie de fluencia asociada a p_0^* (Alonso, *et al*, 1990).

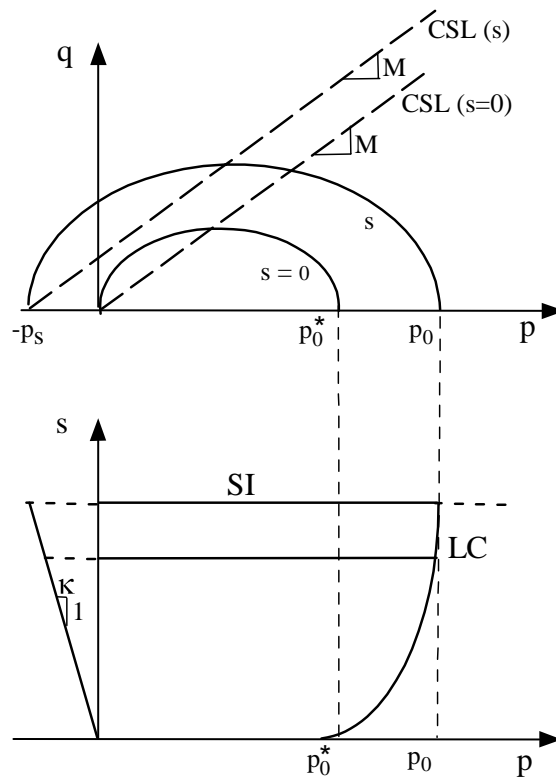


Figura 2.30 Superficie de fluencia en los planos (p, q) y (s, p) .

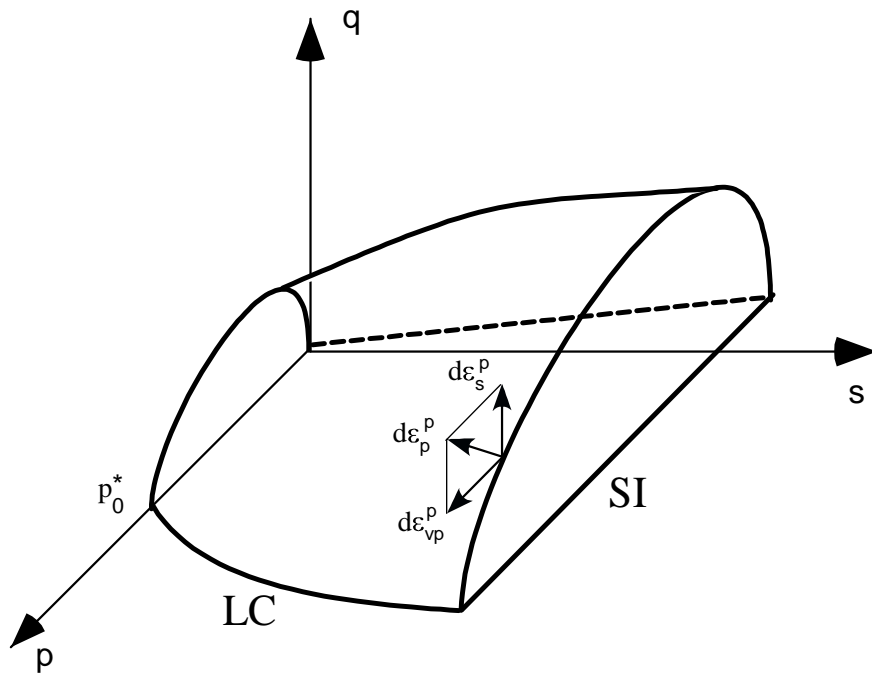


Figura 2.31 Superficie de fluencia del BBM en el espacio (p, q, s) .

CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En las últimas décadas varios investigadores han estudiado la importancia del grado de saturación y de succión en los suelos no saturados, sobre los comportamientos ingenieriles (Fredlund & Morgenstern, 1977; Fredlund, *et al*, 1978; Alonso, *et al*, 1987; Wheeler & Karube, 1995; Wheeler, 1996). Los primeros resultados relacionados con los cambios de volumen, se analizaron bajo condiciones edométricas (Jennings & Burland, 1962; Fredlund & Morgenstern, 1976), o bajo condiciones isotrópicas (Bishop & Donald, 1961 y Matyas & Radhakrishna, 1968). En términos de las propiedades de resistencia se analizaron ensayos de corte directo (Escario, 1980). Más recientemente, la influencia de la succión sobre el comportamiento esfuerzo–deformación en suelos no saturados ha sido examinada por Alonso, *et al* (1987); Delage, *et al* (1987); Wheeler & Sivakumar (1993); Cui & Delage (1996); estos estudios se centran en el uso de dos variables independientes de estado de esfuerzo, es decir, esfuerzo neto ($\omega - u_a$) y succión matricial $s = (u_a - u_w)$, donde u_a y u_w son las presiones de aire y de agua de poros respectivamente; y ω es el esfuerzo total.

En términos de relaciones constitutivas, el marco teórico propuesto por Alonso, *et al* (1987), representa una referencia para los modelos elastoplásticos en suelos no saturados. La formulación matemática del modelo se realizó tres años después (Alonso, *et al*, 1990) y ha sido posteriormente refinada por otros autores (Cui & Delage, 1996; Wheeler & Sivakumar, 1995; Wheeler, 1996). Todos los estudios conciernen a suelos reconstituidos en laboratorio. Por ello cabe mencionar que la evaluación en laboratorio del comportamiento de los suelos no saturados ha tenido un importante desarrollo en las últimas décadas. Una gran cantidad de equipos para el estudio de los fenómenos de colapso e hinchamiento, así como para el estudio general del comportamiento de los suelos compactados se puede encontrar en diversas referencias. La variedad de estos equipos es muy amplia, se han utilizado células edométricas y triaxiales convencionales; modificados o con nuevos diseños de estos equipos con control de succión. De forma análoga, los procedimientos de ensayos han variado, desde los aspectos relacionados con las trayectorias de esfuerzos utilizados hasta, los identificados con la instrumentación y el control. Por otro lado, los estudios sobre suelos como materiales de construcción han recibido menos atención (Geiser, *et al*, 1998; Stoicescu, *et al*, 1998; Tang, *et al*, 1998), aun cuando se emplean como estructuras de tierra tales como terraplenes en presas, en rellenos, etc.

Esta investigación se enfoca principalmente a los comportamientos volumétricos (colapso, expansión y retracción) y de rotura, bajo cambios de succión ($u_a - u_w$) y esfuerzo neto ($\omega - u_a$) en suelos fabricados por un proceso de compactación estática en condiciones isotrópicas. Para ello, uno de los equipos utilizados fue la célula edométrica con control de succión debido a la precisión en la determinación en los cambios de volumen (resolución en la deformación volumétrica 0.010 %). Para investigar el comportamiento volumétrico bajo condiciones isotrópicas se utilizaron dos equipos diferentes (mini-célula isotrópica rígida y célula triaxial con control de succión). Estos equipos ofrecen una indudable ventaja en conocer el estado de esfuerzos sobre la muestra. Sin embargo, las medidas de los cambios de volumen generalmente sometidas a calibraciones y procedimientos indirectos que no ofrecen tan buena resolución y precisión comparándolos con los equipos edométricos, especialmente en la mini-célula isotrópica donde la resolución de las deformaciones volumétricas no es tan buena. Para investigar el

comportamiento de rotura de un suelo con una succión determinada, se utilizó una célula triaxial con control de succión con medidas locales de deformación axial y radial en el centro del espécimen, y medidas globales en los cambios de volumen del suelo y contenidos de agua.

3.2 Sistemas de presión de aire y presión de agua

La presión de aire para el diafragma, pistón y presión de cámara se aplicó mediante un sistema de aire a presión con reguladores. Se dispuso de dos líneas de aire a presión, suministradas por dos compresores que trabajan independientemente: un compresor de baja presión (0.94 \div 0.06 MPa) y otro de alta presión (4.0 MPa con un rango de trabajo usual de 2.8 \div 0.2 MPa). En el caso de caídas de tensión eléctrica o para el suministro de presiones altas, se conectaron a la línea de presión de alta, tanques de nitrógeno seco de 20 MPa, dando un máximo de presión de trabajo de 5.0 MPa. En el caso de una falla eléctrica que afecte los compresores, y detectándose una presión menor o igual a 2.5 MPa, la válvula que conecta a la línea de nitrógeno se activa automáticamente.

La línea de presión pasa a través de un sistema de refrigeración para atrapar y quitar la condensación y suministrar aire seco a los reguladores. Se han usado dos tipos de reguladores de presión: Bellofram, tipo 70, con alimentación hasta 1.8 MPa (rango de trabajo: 10 kPa hasta 0.9 MPa), y Fairchild modelo 10, con alimentación hasta 3.5 MPa (rango de trabajo: 25 kPa hasta 2.5 MPa). Este sistema permite mantener una presión constante en la muestra durante el ensayo. La combinación de los reguladores con transductores de presión permite el control de la presión con una resolución de 1 kPa.

El agua utilizada en los ensayos es inicialmente desaireada y desmineralizada con una conductividad eléctrica menor a 20 σ S/cm, que proviene de un tanque conectado a una bomba de vacío. Cuando se desea controlar la presión de agua se utiliza un elemento interfase, que consiste en una membrana de látex que divide una cámara en dos dominios de aire y de agua. De esta manera, la salida inferior del elemento interfase comunica una presión de líquido igual a la presión de aire, que es transmitida por la membrana en el interior de la cámara.

Los transductores de presión, con un rango operacional de 2.5 MPa, se emplearon para medir presiones de agua y de aire de poros, así como presiones de pistón y de confinamiento. Los transductores adquiridos con su certificado de calibración de fábrica, se verificaron y comprobaron con otro manómetro de referencia, que se verifica periódicamente con una presión de peso muerto. Los errores de no-linealidad y de histéresis dados por el fabricante están dentro de 0.1% FS (2 kPa); para confirmar los errores se realizaron ciclos de aumento y disminución de presión hasta 2.5 MPa, dando un error de no-linealidad de 0.09 % FS, y de histéresis de 0.12 % FS. La típica sensibilidad está alrededor de 2 mV/V \div 3% (10 \div 0.3 mV/MPa a una excitación eléctrica de 10 Vdc).

3.3 Psicrómetro de transistor

El valor de la succión del agua en el suelo en equilibrio con un ambiente de aire húmedo, está ligado termodinámicamente al valor de la humedad relativa de dicho ambiente. La expresión que relaciona ambas magnitudes es la ley psicrométrica (Fredlund & Rahardjo, 1993):

$$h_r = e^{\frac{4M_w s \psi_w}{RT}} \quad (3.1)$$

Donde:

h_r	humedad relativa
M_w	masa molecular del agua (18.016 kg/kmol)
ψ_w	densidad del agua (998 kg/m ³)
s	succión total del agua
R	constante universal de los gases (8.3143 J/ (mol K))
T	temperatura

Por tanto, una medida de la humedad relativa del aire en contacto con el agua de los poros del suelo proporciona inmediatamente el valor de la succión total. La medida de la humedad relativa se realiza mediante la técnica psicrométrica, que consiste básicamente en obtener la diferencia de temperaturas entre un termómetro seco situado en el ambiente cuya humedad quiere medirse y un termómetro húmedo que está rodeado de agua evaporándose de forma continua, por ejemplo, mediante un filtro que se mantiene húmedo. El calor de vaporización hace que descienda la temperatura del termómetro húmedo en forma proporcional a la diferencia entre la presión de vapor en el ambiente y la presión de vapor en condiciones de saturación de éste (humedad del 100%).

El psicrómetro de transistor (tipo SMI: Dimos, 1991; Woodburn, *et al*, 1993) (Fig. 3.1) es un instrumento para medir la humedad relativa del aire dentro de un espacio confinado. Debido a la sensibilidad de los transistores a pequeños cambios de temperatura es posible medir humedades relativas sobre 90 %. Esto permite al psicrómetro de transistor medir succiones de suelo en un intervalo de 0.5 MPa a 15 MPa (Mata, *et al*, 2002). El Psicrómetro Transistor Soil Mechanics Instrumentation (SMI) consiste en tres partes:

- 4 Contenedor aislado térmicamente
- 4 12 sondas psicrométricas
- 4 Un milivoltímetro

La exactitud del instrumento depende del grado de control de temperatura durante todo el ensayo. Por esta razón, las sondas deben insertarse en un contenedor aislado térmicamente. Esto asegura que las sondas y las muestras lleguen a estar y permanecer a una temperatura constante en el período de ensayo. Dado que las sondas son afectadas por cambios de temperatura, se obtiene una mayor exactitud y reproducibilidad si se controla la temperatura ambiente cerca de ± 0.5 °C. En las Figuras 3.2a, b se muestra la sonda y sus componentes. El transistor de bulbo húmedo que contiene en su extremo inferior un pequeño anillo de plástico que se llena con una gota de agua destilada de tamaño estándar. La columna de la sonda cuenta con un pequeño circuito adherido sobre el cual se encuentra montado el amplificador y otros componentes eléctricos ajustados para medir y amplificar la diferencia de temperatura entre el transistor húmedo y el seco. La cabeza de la sonda tiene un botón de ajuste del potenciómetro para fijar el cero después de alcanzar el equilibrio de la temperatura. Una conexión eléctrica que garantiza la energía para el funcionamiento de la sonda y a su vez del voltímetro. Este último tiene un visualizador con el que se puede leer directamente de -23 a $+1\ 000$ mV. La parte inferior de la sonda, normalmente está protegida con un contenedor pequeño de PVC para la calibración, o un contenedor más largo de PVC para medir la succión de la muestra.

La calibración cuidadosa del psicrómetro de transistor consiste en determinar la relación entre los milivoltios de salida del transistor y un valor de succión total, conocida que se lleva a cabo de acuerdo con el procedimiento estándar adoptado por Dimos (1991). Esta relación se afecta por cambios en varios factores, los cuales fueron discutidos por Dimos en 1991, y Truong y Holden (1995), tales como temperatura, histéresis, cambio de calibración con el tiempo, período de equilibrio, forma y tamaño de la gota de agua. Las sondas se calibraron con diferentes soluciones estándar de cloruro de sodio preparadas para dar las diferentes humedades relativas señaladas en la Tabla 3.1. Inicialmente el psicrómetro se lleva a su equilibrio a succión cero con agua destilada ($\Omega 3 \sigma S/cm$), ajustando a un valor inicial la salida de voltaje. Después se toman lecturas con periodos de estabilización de una hora para incrementos de succión comenzando con soluciones salinas de 100 kPa a 10 MPa con una trayectoria monotónica para evitar histéresis en el resultado, en la Fig. 3.3 se muestran las curvas de calibración a temperatura controlada ($22 \pm 1^\circ C$) donde los valores de succión total se grafican contra voltajes. Los especímenes se ensayaron bajo las mismas condiciones que las de calibración.

Tabla 3.1 Soluciones salinas estándar para la calibración del psicrómetro transistor.

Succión total, Φ (MPa)	Molalidad de NaCl, m (mol/kg)
0.10	0.0213
0.32	0.0679
1.00	0.2182
3.20	0.6890
10.00	2.0481

3.4 Célula triaxial automática (GDS Instrument, Ltd)

En las Fig. 3.4 se presenta el esquema general del equipo que consiste de un gabinete donde se monta la célula triaxial, un controlador digital de presión–volumen y un arreglo de conexiones para el sistema de adquisición de datos. El sistema es capaz de controlar en forma automática variaciones de esfuerzo o deformación, según sea la trayectoria del ensayo. En la Fig. 3.5 se muestra una foto del equipo triaxial GDS.

La Fig. 3.6 corresponde a un controlador digital de presión y volumen, el cual puede controlar e imponer una presión de agua, así como obtener los cambios de volumen de agua (agua desaerada y desmineralizada). Se requieren dos controladores; uno para la presión y cambios de volumen de la cámara triaxial, y otro para la presión de cola en la muestra.

En la célula triaxial pueden realizarse ensayos en muestras con diámetro de 38, 50, 70 y 100 mm. La fuerza y el desplazamiento axial se aplica a la base de la célula triaxial a través de un servomotor con un límite de recorrido de ± 100 mm. La fuerza axial se mide con una célula de carga interna sumergible de 2 kN o 10 kN, colocada en la parte superior de la célula. La exactitud y control de las medidas de la fuerza axial es del 0.1 % FS.

La resolución de las medidas y control del desplazamiento axial es de 1 μm . El equipo se utilizó para un programa de ensayos en muestras saturadas; en el Capítulo 4 se presentan las trayectorias de esfuerzos realizadas, y los resultados.

3.5 Desarrollo de una célula edométrica con control de succión

3.5.1 Edómetro convencional

Los edómetros convencionales se utilizaron en un programa de ensayos con el objetivo de determinar, bajo diferentes cargas verticales, la deformación de colapso por inundación del suelo compactado en condiciones isotropas, bajo diferentes condiciones de humedad y densidad (Barrera, *et al*, 1998).

Los edómetros pertenecen al tipo desarrollado por Terzaghi y Casagrande, utilizados normalmente para ensayos de consolidación unidimensional. La muestra de suelo queda confinada en un anillo rígido limitado por encima y por debajo por piedras porosas que permiten el desarrollo de un flujo libre de agua hacia una cámara exterior. La presión se aplica sobre la piedra superior por medio de un pistón y un marco de carga, accionado mediante un sistema de palanca. Las presiones se aplican con pesas que se colocan en el plato que cuelga del brazo de palanca. Este tipo de edómetro se conoce también como edómetro de esfuerzo controlado ya que se aplican presiones y se registran las deformaciones resultantes. Tiene el inconveniente de que no se puede controlar la evolución de la succión.

3.5.2 Desarrollo de la nueva célula edométrica con control de succión

3.5.2.1 Descripción del nuevo edómetro con control de succión

El edómetro neumático con control de succión se diseñó y construyó en los laboratorios de Geotecnia de la U.P.C. (Universidad Politécnica de Cataluña).

Se basa en el diseño de los edómetros con control de succión utilizados por Balmaceda (1991), Yuk Gehling (1994) y Romero (1999). El nuevo edómetro permite ejecutar ensayos edométricos sobre muestras de suelo no saturadas, controlando la succión matricial o total durante todo el ensayo. La succión matricial se controla mediante la aplicación de la técnica de traslación de ejes y la succión total con la técnica de equilibrio de vapor.

3.5.2.1.1 Descripción de la célula edométrica

El edómetro consta principalmente de cuatro cuerpos: base, anillo edométrico, cuerpo intermedio y cuerpo superior (Fig. 3.7). En las uniones entre las distintas partes del aparato se utilizan juntas tóricas para asegurar un cierre estanco.

El cuerpo inferior (base) está diseñado para acoplar dos sistemas de pedestales que alojan piedras porosas para realizar ensayos con succión controlada (identificada con el no. 1 en la Fig. 3.10):

1. Con el primer diseño de pedestal se controla la succión matricial con el método de traslación de ejes, el pedestal tiene un diámetro de 56 mm, donde se aloja un disco cerámico (AVEA) de 1.5 MPa con un diámetro de 50 mm, y 7.15 mm de altura (Fig. 3.8a).
2. El segundo sistema se emplea para controlar una succión total (Φ) con la técnica de equilibrado de vapor, o controlar la succión matricial con la técnica de traslación de ejes, ya que la muestra descansa sobre una combinación de dos piedras porosas alojadas en el pedestal: un disco

cerámico de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa), con diámetro de 36 mm y altura de 7.15 mm, y una segunda piedra porosa anular muy permeable concéntrica con el disco cerámico, cuyo diámetro interior y exterior son de 41 mm y 51 mm, respectivamente (Fig. 3.8b).

En el presente trabajo se investigó el efecto de la variación de la succión matricial sobre la deformabilidad del suelo. El segundo sistema de pedestal (Fig. 3.8b) se empleó para determinar la deformación de colapso disminuyendo la succión matricial hasta lograr grados de saturación del 100 %. En este caso se utilizó la piedra porosa anular para inundar la muestra.

En ambos sistemas, el pedestal presenta dos orificios (Fig. 3.8c) en su parte superior conectados por un canal de forma espiral de 3 mm de profundidad. La razón por la que se adoptó una doble entrada de presión de agua, es para crear un flujo de agua a presión en cada conducto, que permita eliminar las burbujas de aire disueltas, como consecuencia de la técnica de traslación de ejes durante el ensayo (Nos 2 y 3, Fig. 3.10).

Se tomó especial cuidado en la instalación del disco cerámico (AVEA) en el pedestal. El disco ($\lambda \# 50$ mm, $h = 7.15$ mm ó 36 mm, $h = 7.15$ mm) se selló en el pedestal usando una resina especial en su perímetro, previamente limpiado con tricloroetileno para quitar la grasa del metal y del disco cerámico. Esta resina es resistente al agua así como a temperaturas de hasta 120 ^\circ C . Una vez que el disco cerámico se sella se introduce en un horno a 50 ^\circ C , durante 2 horas, con la finalidad de eliminar las burbujas de aire atrapadas en el sello (Fig. 3.8).

Este disco cerámico (No 11, Fig. 3.10) se comunica por la cara inferior con un sistema de presión de agua regulada mediante un sistema interfase (No 3, Fig. 3.10) y por la cara superior al sistema de presión de aire (No 6, Fig. 3.10). La diferencia entre la presión del aire y la de agua es la succión matricial aplicada a la muestra ($u_a - u_w$).

Sobre el disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) se encuentra la muestra, confinada en un anillo de acero inoxidable de 50 mm de diámetro interior, 65 mm de diámetro exterior, y 20 mm de altura, que se aloja en el cuerpo central (No 4, Fig. 3.10); se apoya sobre una junta tórica para asegurar la estanqueidad del conjunto. El cuerpo superior se une al cuerpo central con 4 tornillos M 10x30 y al cuerpo inferior con otros 4 tornillos M 10x30 (Fig. 3.7). Entre el cuerpo superior y el cuerpo central ajustan una membrana de goma impermeable de 1 mm de espesor (Fig. 3.7 y no. 5, Fig. 3.10), formando una cámara que contiene aire a presión. Este sistema permite aplicar la presión en la muestra por medio de un pistón de bronce, donde en su parte inferior se coloca un filtro de bronce de alta permeabilidad (diámetro de poros 85 μm) del mismo diámetro de la muestra, cuya función es repartir uniformemente la presión aplicada sobre toda la muestra, y aplicar la presión de aire de poros (u_a) (No 12, Fig. 3.10).

Una de las ventajas de este edómetro es la combinación de dos pistones diferentes. Uno permite aplicar a la muestra una presión vertical neta igual a la diferencia entre la presión del pistón y la de aire en la muestra (u_a). El segundo aplica la presión vertical neta hasta el doble de la presión máxima del sistema de aire comprimido empleado (Nos 7 y 8, Fig. 3.10).

En un marco de acero inoxidable, unido en la parte inferior (base) del edómetro, se coloca un micrómetro mecánico con una resolución de 2.0 μm para medir los cambios de altura que experimenta

la muestra durante el ensayo (Fig. 3.10). Para calibrar el edómetro se colocó en lugar de la probeta de suelo, un cilindro de acero con las mismas dimensiones de la probeta de suelo, y se midieron las deformaciones correspondientes a las mismas trayectorias de esfuerzos realizadas en el programa de ensayos. El cilindro de acero se considera indeformable con estas cargas de trabajo, y las deformaciones registradas se deben exclusivamente al aparato.

3.5.2.1.2 Equipos complementarios

Las variaciones del volumen de agua intersticial se miden con una bureta graduada (resolución de 20 mm³) ubicada en el interior de un cilindro de metacrilato de 30 mm de diámetro interior y 680 mm de longitud. La parte inferior de ambos cilindros concéntricos están llenos de agua mientras que la parte superior con un gasoil de un color claramente diferenciado y una densidad más baja que el agua, asegurándose la inmiscibilidad (Fig. 3.9). El menisco formado por los dos líquidos se desplaza dentro de la bureta, el cual indica la cantidad de agua que entra o sale de la muestra; por consiguiente, determina los cambios en contenido de agua y el tiempo de equilibrio entre las presiones intersticiales de aire y agua. En el circuito del medidor de volumen de agua intersticial, se conecta a un interceptor de burbujas de aire (IBA), funcionando como trampa de aire; si el flujo de agua contiene una burbuja de aire, al llegar al IBA tiende a quedarse en la parte superior de la cámara (Fig. 3.9).

El agua desaerada viene presurizada a través de un sistema interfase (Fig. 3.9). La interfase es un elemento que recibe por una de las entradas una presión de aire determinada convirtiéndose como salida la misma presión de un fluido. Consiste en una cámara cilíndrica de 200 mm de longitud de acero inoxidable. Una membrana de látex ajustada a la cara superior divide la cámara en dos dominios aire y agua; de esta manera, la salida inferior del elemento interfase comunica una presión de líquido igual a la presión de aire, que es transmitida por la membrana en el interior de la cámara. En el Anexo A se describe la metodología de los pasos previos al ensayo, preparación de la muestra, montaje, metodología del ensayo, y desmonte de la muestra al finalizar el ensayo.

3.5.3 Calibración mecánica: deformación de la célula edométrica

Se ha tenido especial cuidado en calibrar la carga vertical, y medir las deformaciones intrínsecas del edómetro bajo incrementos de esfuerzo vertical neto. Los resultados de la deformabilidad de la estructura de la célula edométrica ante incrementos y decrementos de esfuerzo vertical neto, se presentan en la Fig. 3.11. La muestra ha sido sustituida por un cilindro de acero de 20 mm de altura y 1 mm menos que el diámetro del anillo. Los ciclos de calibración se realizaron bajo una presión de aire constante de $u_a = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ MPa. Un primer ciclo carga–descarga se aplicó para eliminar el asentamiento inicial en el contacto entre el pistón de carga (filtro poroso) y cilindro de acero, cilindro de acero y disco cerámico saturado. Las deformaciones se asocian principalmente con errores de asentamiento debido a los acoplamientos entre los diferentes elementos indicados previamente. Los errores de acoplamiento por irregularidades en la superficie de las interfaces entre la muestra y la superficie de carga podrían no ser directamente determinadas por el procedimiento de calibración; sin embargo, se espera que estos errores sean relativamente pequeños debido a la técnica de preparación de la muestra (donde las superficies son cortadas horizontalmente). Las deformaciones del equipo en trayectorias de humedecimiento–secado son despreciables, ya que se realizan a un esfuerzo vertical neto y presión de aire constante. Los desplazamientos totales medidos para una

trayectoria de carga o descarga bajo succión matricial constante se corrigen restando los valores correspondientes de calibrado para un mismo aumento o decremento del esfuerzo vertical neto de acuerdo con la expresión de la Fig. 3.11. La presión vertical neta calculada $(\omega_v - u_a)_c$ ejercida por pistón con el diafragma puede teóricamente determinarse considerando el equilibrio con la siguiente expresión (de acuerdo con el esquema de la Fig. 3.12). La ecuación empleando el pistón de presión vertical para presiones altas es:

$$(\omega_v - u_a)_c = \frac{A_p - A_r}{A_a} (\omega_v - u_a) \quad (3.2)$$

La ecuación de equilibrio empleando el pistón de presión vertical para presiones bajas es:

$$(\omega_v - u_a)_c = \frac{A_p - A_r}{A_a} (\omega_v - u_a) \quad (3.3)$$

Donde ω_v es la presión vertical sobre el diafragma; y u_a la presión de aire en el suelo; A_p el área del pistón de carga ($\lambda = 71.0$ mm pistón de presión alta; $\lambda = 49.8$ mm pistón de presión baja); A_r área del eje del pistón ($\lambda = 4.0$ mm); A_a área del suministro de la presión de aire ($\lambda = 49.8$ mm).

El pistón aplica la carga sobre un filtro de bronce con un área A_a en contacto con la muestra de suelo ($\lambda = 49.8$ mm). La calibración de la carga transmitida por el diafragma y el pistón se calcula de acuerdo con la Fig. 3.12.

De la curva de calibración de la Fig. 3.11 y con el criterio de la presión vertical neta transmitida sobre la muestra (Fig. 3.12), se conoce la deformación real de la muestra, bajo trayectorias de esfuerzo vertical neto.

3.5.4 Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua en los discos cerámicos (AVEA)

Para obtener valores de permeabilidad del suelo, bajo diferentes condiciones de succión es fundamental conocer las características del disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) para poder asignar la adecuada permeabilidad del disco correspondiente en los diferentes ensayos. Por ello, se midieron periódicamente los coeficientes de permeabilidad de los discos cerámicos saturados (valor de entrada de aire de 1.5 MPa) de los equipos edométricos, mini-célula isótropa rígida y célula triaxial.

El procedimiento para determinar la permeabilidad de los discos cerámicos, primeramente consistió en inundar con agua desmineralizada y desaerada la cámara de aire de la célula edométrica, la cual se forzó a cruzar el disco cerámico a diferentes presiones de 3.0, 2.0 y 1.5 MPa, resultando una carga piezométrica de $t_h = 300, 200$ y 150 m calculado con un peso unitario del agua de 10 kN/m^3 . En el caso de la mini-célula isótropa rígida, la cámara de confinamiento se llenó con agua desmineralizada y desaerada, donde también fue forzada a cruzar el disco cerámico a diferentes presiones de 2.2 y 1.5 MPa ($t_h = 220$ y 150 m). En la Fig. 3.14 se observan los accesorios para lograr la saturación de los discos cerámicos del cabezal y pedestal del equipo triaxial y así obtener su permeabilidad (k_d). De igual

manera que en el edómetro y en la mini-célula isótropa, el agua fue forzada a cruzar el disco cerámico a diferentes presiones: 2.8, 1.5, 1.2 y 1.0 MPa, resultando una carga piezométrica de $\psi = 280, 150, 120$ y 100 m. El volumen de agua que fluye a través del disco cerámico (espesor: $\psi = 7.15 \pm 0.05$ mm) debido al gradiente, es medido usando unos indicadores de cambio de volumen de agua. Esta medida de volumen V_m es dibujada contra lapsos de tiempo en la Fig. 3.13 (célula edométrica), Fig. 3.15 (mini-célula isótropa rígida), y en la Fig. 3.16 (célula triaxial). El coeficiente de permeabilidad k_d se determina por la siguiente expresión:

$$k_d = \frac{\psi V_m \psi}{\psi t \psi A} \quad (3.4)$$

Donde ψV_m es el volumen de agua medido que cruza el disco cerámico en un área de sección transversal A (diámetro del disco: 50 mm (edómetro); 10 mm (mini-célula); 24 mm (célula triaxial)) durante un incremento de tiempo ψt . En la Fig. 3.13 se muestra la evolución de la permeabilidad con el tiempo del disco cerámico de la célula edométrica con una permeabilidad inicial de 6.7×10^{-11} m/s hasta 5.4×10^{-11} m/s. La Fig. 3.15 señala la pérdida de la permeabilidad del disco cerámico con el tiempo de la mini-célula isótropa rígida con una permeabilidad inicial de 1.1×10^{-10} m/s hasta 4.1×10^{-11} m/s, y en la Fig. 3.16 muestra los resultados de la evolución de la permeabilidad tanto del cabezal como del pedestal de la célula triaxial, con valores iniciales de 1.2×10^{-10} m/s (cabezal) y 8.5×10^{-11} m/s (pedestal).

Se observó para los diferentes discos cerámicos en contacto con el suelo, que el progresivo efecto de envejecimiento disminuye la porosidad del disco y por consecuencia su permeabilidad intrínseca. Los discos cerámicos contienen diferentes proporciones de caolín, alúmina, talco y materiales feldespáticos: 56% SiO_2 , 15% Al_2O_3 , 12% MgO , y pequeñas cantidades de Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , K_2O y Na_2O , según especificaciones del fabricante (Soilmoisture Equipment Corp Specifications). Los cambios de porosidad pueden deberse a la oclusión de la cerámica por migración de coloides o efectos de intercambio catiónico a través del agua. Los discos cerámicos tanto del cabezal como del pedestal de la cámara triaxial, se reemplazaron al final de los ensayos isótropos y antes de comenzar el programa de ensayos triaxiales (Fig. 3.16). Los discos cerámicos de la célula edométrica y la mini-célula isótropa se reemplazaron antes de comenzar los programas de ensayos.

3.5.5 Determinación de la permeabilidad no saturada

Durante cada ensayo edométrico, la permeabilidad al agua fue determinada. En las trayectorias de humedecimiento ($C \downarrow D$, Fig. 5.2–5.5); en cada etapa se midió el flujo transitorio de agua con el tiempo. Los resultados fueron interpretados con una ecuación modificada de Richards (Kunze & Kirkham, 1962; Romero, *et al.*, 2000) por lo que ha sido posible estimar la variación de la permeabilidad al agua del suelo en estudio en función del grado de saturación (S_r). La cantidad unidimensional del agua en régimen transitorio se expresa en el caso de un suelo no saturado por la ecuación de Richards (1931) (Vicol, 1990; Romero, 1999):

$$\frac{\psi \psi \chi_0}{\psi t} = 4 \frac{\psi \psi q_w \psi_0}{\psi z} 2 r; q_w = 4 k_w / h_w \left(\frac{\psi \psi h_w}{\psi z} 2 l \right) \quad (3.5)$$

en el caso donde $\psi_w =$ constante, se obtiene:

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + C/h_w \frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w/h_w \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w/h_w \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) + \frac{r}{\Psi_w} \quad (3.6)$$

Donde χ representa el contenido volumétrico de agua ($\chi = n S_r = G_s w / (1+e)$); t el tiempo; z la cota geométrica del punto genérico (tomada como positiva si se encuentra por encima del plano de referencia); q_w el flujo de agua volumétrico [$L T^{-1}$]; r el término fuente / sumidero [$M L^{-3} T^{-1}$] ($r = 0$ para los siguientes análisis), h_w altura asociada a la presión del agua intersticial dada como $h_w = u_w/v_w$ [L], siendo $k(h_w)$ la permeabilidad no saturada [$L T^{-1}$], y $C(h_w) = d\chi/dh_w$, la derivada de la curva de retención [L^{-1}]. El potencial gravitacional puede considerarse despreciado para este estudio dado el pequeño espesor de la muestra. Además de que se simplifica la ecuación anterior a una ecuación de difusión. Introduciendo D_w que representa la difusividad capilar [$L^2 T^{-1}$] (Gardner, 1956), resulta:

$$D_w/h_w \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w/h_w \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \chi}{\partial z} \quad (3.7)$$

La ecuación de la continuidad del agua se convierte en

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + C/h_w \frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w/h_w \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Si se asume una relación lineal entre el contenido de agua volumétrico y el potencial matricial, lo cual es válido para pequeños incrementos/decrementos de presión de agua, y que D_w es constante resulta la siguiente expresión:

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_w/h_w \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = D_w \frac{\partial^2 h_w}{\partial z^2} \quad (3.9)$$

Para facilitar la determinación de la permeabilidad no saturada, se asume que k_w (o difusividad D_w) se mantiene constante para pequeños cambios en la presión de agua (Romero, 1999).

Las condiciones iniciales y de frontera en ensayos edométricos con cambio de succión, controlando el flujo de salida o el flujo de entrada puede expresarse matemáticamente como:

$$\begin{aligned} h_w(z, t) &= h_{w0} && \text{para} && t = 0 \text{ y } 0 \leq z \leq L \\ h_w(z, t) &= h_{w0} + \Delta h_w && \text{para} && t > 0 \text{ y } z = 0 \\ \frac{\partial h_w}{\partial z} \Big|_{z=L} &= 0 && \text{para} && t > 0 \text{ y } z = L \end{aligned}$$

Donde L es la altura de la muestra.

El plano de referencia, $z = 0$, se considera coincidente con la base inferior de la muestra. La condición inicial corresponde a una condición de equilibrio a través de la muestra. Durante el ensayo edométrico el frente de avance del agua viene de abajo hacia arriba, esto significa que no se permite ningún flujo de agua de la parte superior de la muestra (velocidad del agua nula para $z = L$).

Gardner (1956) y Vicol (1990) han integrado la ecuación de la cantidad de agua en función de la variación del volumen de agua intersticial al tiempo, t , $Q(t)$:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - 4 \frac{8}{\phi^2} \frac{1}{m_0 / 2m_2 10^6} \exp\left\{ -4 / 2m_2 10^6 \phi^2 \frac{D_w t}{4L^2} \right\} \quad (3.10)$$

Q_0 representa la variación total del volumen de agua intersticial correspondiente al intervalo de variación de la succión.

Miller y Elrick (1958), y Kunze y Kirkham (1962) modificaron la ecuación anterior para tener en cuenta la impedancia del disco cerámico:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - 4 \frac{2 \exp\{-\zeta_n^2 D_w t / L^2\}}{\zeta_n^2 / a + 2 \csc^2 \zeta_n} \quad (3.11)$$

Esta es la expresión utilizada para analizar los datos experimentales. Donde Q_0 representa la variación total del volumen de agua intersticial correspondiente al intervalo de variación de la presión de agua; $Q(t)$ la variación del volumen de agua al tiempo t ; a la relación de impedancia del disco cerámico a la impedancia del suelo.

$$a = \frac{k_w L_p}{L k_p}$$

(L_p es el espesor del disco cerámico y k_p su permeabilidad) y ζ_n la n -ésima solución de la ecuación: $a \zeta_n = \cot \zeta_n$ ($n = 1, 2, \dots$). Para resolver la ecuación 3.11 se introduce una nueva condición de contorno:

$$k_w \frac{\partial h_w}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\Psi_{w0} 2 \div h_w 4 h_w / 0, t 0 k_p}{L_p} \quad \text{para} \quad t > 0 \text{ y } z = 0$$

La ecuación utilizada para determinar la permeabilidad no saturada se basa en las siguientes hipótesis simplificadas:

- ∄ El esqueleto del suelo se considera rígido
- ∄ El flujo de agua se considera unidimensional e isotérmico
- ∄ El líquido es incompresible
- ∄ El potencial gravitatorio igual a cero
- ∄ D_w constante

En la Fig. 3.17, se muestra la variación de la permeabilidad no saturada (k_w) en función de grado de saturación (S_r); se observa que la permeabilidad no saturada (k_w) aumenta con el grado de saturación, y disminuye progresivamente al aumentar la carga vertical neta ($\omega_v - u_d$) aplicada sobre la muestra.

3.6 Mini – célula isótropa rígida con control de succión

3.6.1 Diagrama general. Modificaciones para ensayos isótropos

La mini-célula isótropa rígida con control de succión se diseñó y construyó en el laboratorio de Geotecnia de la ETSECCPB. En la Fig. 3.20, se presenta dicho equipo; la célula fue descrita por Cruz (1996), y Romero (1999). El diseño de la célula cumple con dos características principales:

- ∄ Con las reducidas dimensiones de las probetas, que son de geometría cilíndrica, con un diámetro de 20 mm y una altura de 20 mm, se logra disminuir el tiempo de estabilización de las presiones de aire y agua en el interior de la muestra (Fig. 3.19)
- ∄ La segunda característica, tal como su nombre lo indica, la muestra se somete a un estado de esfuerzo isótropo. Se apoya sobre una base, quedando las caras laterales y superior libres en contacto con el agua de confinamiento, a través de una membrana de látex que comunica la misma presión en todas direcciones

Utilizando la técnica de traslación de ejes, las presiones de aire y agua son impuestas en el pedestal del espécimen. La presión de agua se controla en el centro de la probeta por un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa) y 10 mm de diámetro. La presión de aire se aplica a través de una segunda piedra porosa anular de acero inoxidable concéntrica con el disco cerámico (20 mm diámetro exterior y 15 mm diámetro interior) de 3 mm de espesor.

Las medidas de la deformación volumétrica del espécimen, se realizan controlando los cambios de volumen de agua en la cámara de la célula. Las paredes de esta cámara presentan un grosor de 29 mm en acero inoxidable con el objetivo de minimizar posibles deformaciones del equipo, de manera que las deformaciones registradas correspondan realmente a la muestra (Fig. 3.19). Dos aparatos medidores de cambios de volumen (bureta calibrada con un rango de $5.0 \times 10^3 \text{ mm}^3$ y una resolución de 10 mm^3) se usan para medir cambios de volumen de agua intersticial y cambios de volumen total del espécimen. En la Fig. 3.20 se presenta un esquema de la mini-célula isótropa rígida. Este equipo presenta una baja resolución volumétrica alrededor de 0.3 %, debido a lo reducido de las dimensiones de la muestra. También pequeñas variaciones de temperatura pueden afectar las medidas de deformación (alrededor de $20 \text{ mm}^3/\text{°C}$) debido a la dilatación térmica del agua contenida en la cámara de confinamiento de $54.5 \times 10^3 \text{ mm}^3$. En el Anexo B se describe con más detalle la mini-célula isótropa rígida, equipos auxiliares, preparación de la muestra, montaje y desmontaje de la muestra.

3.6.2 Variación de esfuerzos y control de las trayectorias de esfuerzos

La variación, y control de las trayectorias de esfuerzos sobre la muestra se controlaron por medio de un motor de corriente continua y un reductor mecánico (Fig. 3.20). Las tres presiones generadas que afectan al estado de esfuerzo de la muestra son: presión de confinamiento (p); presión de aire (u_a), y presión de agua (u_w); de acuerdo con los esfuerzos efectivos definidos en el Capítulo 2, estos parámetros de esfuerzo se pueden reducir a cualquiera de las dos parejas de esfuerzos allí indicadas ($\sigma_n - u_a$, $u_a - u_w$). En los ensayos, la presión de aire (u_a) se mantuvo siempre fija, sin limitar las trayectorias de esfuerzos posibles en el espacio (p , s). Con u_a constante, sólo es necesario utilizar para controlar p y u_w un equipo de variación continua a velocidad constante, lo cual representó una simplificación de interés. Con este sistema se puede imponer un rango muy amplio de velocidades;

para estos ensayos se emplearon las velocidades según la trayectoria de la Tabla 3.2. De esta manera se aumentó o disminuyó en forma continua y constante la presión de cámara de confinamiento a succión constante. En trayectorias de cambio de succión matricial con presión de confinamiento constante, la presión de agua (u_w) también se hizo variar en forma continua y constante con el motor reductor. En el Anexo B se describe las características del motor reductor, y su aplicación.

Tabla 3.2 Velocidades utilizadas para el incremento de presión (mini-célula isotropa).

Trayectoria	Incremento de presión (MPa/día)
Carga	0.04
Descarga	0.10
Humedecimiento	0.02
Secado	0.02

3.7 Célula triaxial con control de succión

3.7.1 Descripción del equipo

Es un equipo novedoso que permite realizar complejas trayectorias controlando independientemente los esfuerzos netos y la succión matricial se construyó de acuerdo con el esquema mostrado de la Fig. 3.21a y 3.21b (Romero, *et al*, 1997; Romero, 1999; Barrera, *et al*, 2000). La célula triaxial hidráulica con control de succión fue diseñada y construida en el laboratorio de Geotecnia de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña).

El diseño básico de la célula triaxial se basó en el equipo triaxial hidráulico de Bishop y Wesley (1975), donde las trayectorias de esfuerzo se controlan con movimientos de pedestal que empujan la muestra contra una célula de carga interna fija. El equipo se diseñó, principalmente para ensayos en muestras no saturadas (no obstante el diseño del equipo, permite realizar ensayos en muestras saturadas) de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura. En su concepción mecánica, la célula es de esfuerzo controlado o deformación controlada tanto en compresión axial, como en extensión axial. En esta investigación el programa de ensayos se realizó a deformación controlada mediante una cámara de presión que se llena con un líquido incompresible (identificada con el número 7 de la Fig. 3.21a). Una célula de carga miniatura de 8.9 kN compensada a presión, se rosca entre el cabezal y el pistón superior (Fig. 3.22a), y se mantiene fija en posición por el tornillo superior de carga (No 17, Fig. 3.21a). Este arreglo permite ensayos de extensión triaxial, impide las rotaciones del cabezal–muestra, y mantiene la alineación entre el pistón de carga y el cabezal de la muestra; en la Fig. 3.21a, se aprecia el pistón de carga inferior; con el mismo diámetro de la muestra, prevé la independencia del esfuerzo vertical de la presión de cámara.

Para los ensayos de compresión isotropa, el pistón inferior de la cámara de presión de carga vertical, se bloquea a una altura especificada por un cilindro de acero de 65 mm de altura instalado entre la base y el pistón inferior (Fig. 3.21a). El cabezal del espécimen se desenrosca de la célula de carga, por tanto, del pistón superior. Esto dificulta que la muestra permanezca en posición vertical durante el montaje o trayectorias de carga y descarga. Para evitar este problema se usa un aparato de alineación no-contacto para control de la inclinación del espécimen, el cual reemplaza la célula de carga. La máxima inclinación inicial del espécimen se controla a un máximo de $0\sqrt{45}^{\circ}$ (Fig. 3.22b).

La succión matricial se aplica con la técnica de traslación de ejes y el control de la presión positiva de agua y aire que mantiene una diferencia igual a la succión prescrita. Una característica, a diferencia de los equipos triaxiales mencionados, es la posibilidad de independizar o aplicar simultáneamente la presión de agua y aire requerida para control de la succión matricial ($u_a - u_w$), en los dos frentes extremos de la probeta. En este caso, tanto el cabezal como el pedestal incluyen una combinación de dos diferentes piedras porosas (Fig. 3.14a y 3.23): un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) de 1.5 MPa conectado al circuito de presión de agua (No 9, 10 y 11, Fig. 3.21a), y rodeado por un anillo de acero inoxidable poroso (3 mm de espesor, 10 μ m tamaño de poro) conectado al sistema de presión de aire. Este procedimiento de aplicación de la succión en ambos extremos de la probeta reduce sustancialmente el tiempo de equilibrio al disminuir la distancia de drenaje. Esta es una importante ventaja cuando se ensayan suelos no saturados con una baja permeabilidad, pero presenta el inconveniente de atrapar aire en el centro de la muestra cuando avanzan los dos frentes extremos en trayectorias de humedecimiento. Los cambios de contenido de agua en el suelo se calculan midiendo el volumen de agua por medio de dos buretas de 10 mm³ de resolución conectados a ambos discos cerámicos (AVEA). Estos valores se corrigen tomando en cuenta la cantidad de aire disuelto a través del disco cerámico.

Puede usarse como fluido de confinamiento, aire o aceite de silicona de baja viscosidad; el aceite de silicona lo empleó Romero (1999) en ensayos isótropos térmicos, ya que su baja conductividad eléctrica no provoca interferencias en los transductores internos.

Para este trabajo se optó por el aire como fluido de confinamiento. La migración de aire del fluido de confinamiento hacia la muestra se redujo por el uso de dos membranas separadas con grasa de silicona. La presión de confinamiento fue por medio de aire a presión (4.0 MPa, máxima presión de cámara). Una cámara de metacrilato de 15 mm de espesor es externamente cubierta por un cilindro de acero inoxidable AISI 316 (15 mm de espesor), provisto de cuatro ventanas (30 mm de ancho): dos para observar los transductores LVDT internos, y dos para pasar el haz de luz del sensor óptico láser hacia la muestra (Fig. 3.21b y 3.24).

3.7.2 Medida de parámetros

Los parámetros a controlar deben definir completamente el estado de esfuerzo y el estado de la muestra en cada momento; por tal motivo, el equipo cuenta con los siguientes condicionantes generales con el fin de conseguir la máxima información y versatilidad en los ensayos:

- a) Es importante durante todo el proceso de ensayo, controlar el estado de esfuerzos a que se somete la muestra (ω , ω_s , u_a y u_w), y conocer el estado deformacional (κ_s y κ_c), así como su humedad (w) y grado de saturación (S_r) correspondiente, de forma tal que se obtenga el comportamiento tenso-deformacional e hidráulico completo del suelo
- b) Tanto el proceso de ensayo (seguimiento de las historias de esfuerzos) como la obtención y almacenamiento de resultados se debe realizar en forma automatizada. Esto permite ensayos largos en el tiempo y con historias de esfuerzos complejas, sin necesidad de un control personal continuo
- c) Se debe manejar adecuadamente toda la información (transmisión, procesado y salida de resultados)

El estado de esfuerzos quedará determinado con $\omega_l - u_a$, $\omega_b - u_a$ y $u_a - u_w$. Será en consecuencia necesario medir ω_l , ω_b , u_a y u_w ó $u_a - u_w$, con los cuales se podrá obtener el esfuerzo esférico $p = \frac{\omega_l + 2\omega_b}{3} - u_a$, el esfuerzo de corte $q = \omega_l - \omega_b$, y la succión $s = u_a - u_w$, que son los parámetros habituales en ensayos triaxiales de suelos no saturados.

3.7.2.1 Desplazamiento axial. Transductores LVDTs

El desplazamiento axial se registró medido realizando dos medidas, una interna local (κ_c) y la segunda externa global (κ). El objetivo de las medidas locales internas de la deformación axial del espécimen fue evitar errores de apoyo en los extremos del espécimen en contacto con el cabezal y pedestal, y los errores generados por la deformación de la célula de carga. Por otro lado, en ensayos isótropos, no se mide la deformación axial externa (global), debido a que el pistón de carga es bloqueado durante el ensayo. No obstante, en los ensayos triaxiales, la medida de la deformación axial global se realizó por un transductor (LVDT) de desplazamiento fijo en el pistón de carga (Fig. 3.32), con objeto de corroborar los desplazamientos axiales locales. En la Fig. 3.33 se presenta su curva de calibración.

El desplazamiento axial se midió internamente con dos transductores miniatura LVDT (modelo SM3 de Schlumberger) adheridos en la membrana, colocados en la parte central de la probeta en dos posiciones diametralmente opuestas (No 2, Fig. 3.21a). Las principales características de fabricación son: rango de trabajo, \varnothing 3 mm; sensibilidad típica a 5 kHz, 136 mV/V/mm; opera a temperaturas, - 40 $^{\circ}\text{C}$ a 85 $^{\circ}\text{C}$; y peso de 8.7 g. Los LVDTs se alimentan con 5.17 V rms a 5.031 kHz por medio de un controlador dando una sensibilidad de 1.422 $\sigma\text{m/mV}$. La salida analógica de esta unidad (0 a \varnothing 10 Vdc) da una señal preconditionada (modificada a una sensibilidad de 0.30 $\sigma\text{m/mV}$) antes de la conexión al convertidor A/D. Esta unidad también contiene un display (tarado, alarmas y promedio de lecturas), lo cual permite una visualización on-line de la evolución del desplazamiento axial.

Para fijar los transductores en la muestra, se desarrollaron soportes de PVC fijados lateralmente a la muestra sobre la membrana de látex con pegamento instantáneo de tipo cianoacrilato de acuerdo con el esquema de la Fig. 3.25. Para el montaje de los transductores se utilizó una guía especial, que los posiciona siempre a la misma altura de la muestra. Se realizaron medidas para determinar el efecto de las presiones de cámara elevadas sobre los sistemas LVDT, y se encontró que los sensores LVDT no sufrieron perturbaciones sobre el rango experimentado en el ensayo (hasta 2.5 MPa). Sin embargo, algunos pequeños errores de acomodo de los soportes de los LVDT bajo incrementos de presión se detectaron en una muestra falsa de acero inoxidable, usualmente entre \varnothing 5 σm y 10 σm cuando la presión de confinamiento se incremento hasta 0.2 MPa comenzando de la condición atmosférica. Los transductores LVDTs fueron cuidadosamente calibrados; las curvas de calibración de la Fig. 3.26 muestran una adecuada linealidad.

3.7.2.2 Desplazamiento radial. Sensores láser electro – óptico

En el Capítulo 2 se mencionan los diferentes sistemas para obtener medidas directas y locales de la deformación radial en ensayos con muestras no saturadas, cuyo objeto es obtener resultados más

confiables y precisos. Los sistemas de medición radial deben satisfacer las siguientes necesidades (Romero, 1999):

- € Ser estables en ensayos largos en tiempo, y tener alta resolución en deformaciones con un mínimo del 10^{-2} %
- € Tener poca influencia sobre la deformación del espécimen
- € Ser capaz de medir deformaciones grandes en varios sitios a lo largo del espécimen
- € No ser afectados por ruidos eléctricos y ser exactos en la adquisición de datos a velocidades rápidas
- € No ser afectados por cambios de presión de cámara y temperatura
- € Ser simples de operar e instalar

Existen sistemas para medir deformaciones laterales bastante exactos pero es difícil satisfacer todos los puntos mencionados, especialmente con respecto a la medida en varios sitios de la probeta de no ser afectados por los cambios de presión de cámara y temperatura, simplicidad en su instalación y operación. Debido a estas limitaciones se decidió buscar un sistema de alta resolución que pudiera instalarse externamente a la cámara con objeto de detectar los desplazamientos laterales a lo largo del perfil de la muestra y no ser afectado por variaciones de presión y temperatura dentro de la cámara. Como resultado de lo anterior se enfocó un sistema de sensor láser electro-óptico, que proporciona una alta exactitud dentro de un amplio rango de mediciones a diferentes distancias desde el cabezal del sensor hasta el objeto. El sistema ha sido utilizado por Romero, *et al* (1997); Romero (1999) y Barrera, *et al* (2000, 2001).

Los sensores láser electro-ópticos se basan en el principio de la técnica de triangulación (Fig. 3.27). Un controlador modelo LB-72, y un cabezal sensor, modelo LB-12, de Keyence Laser Displacement Sensors, se consideraron apropiados para satisfacer los requerimientos de sensibilidad, tamaño y rangos de medición en los ensayos; las principales características de estos sensores láser son: la distancia del rango de regulación del cabezal sensor a la superficie de contacto, varía entre 30 y 50 mm (aire como medio transparente), con un rango de medición de ∂ 10 mm a una distancia de referencia de 40 mm (Fig. 3.27a); resolución de 2 σ m a una respuesta de 60 ms (frecuencia de respuesta de 6 Hz), no-linealidad alrededor de 10 σ m/mm; sensibilidad obtenida de un controlador de voltaje de salida analógica entre 1 σ m/mV y 2 σ m/mV.

Los sensores se colocaron en el exterior de la cámara triaxial sobre soportes rígidos con el objeto de medir las deformaciones radiales en dos posiciones diametralmente opuestas del espécimen (No 3, Fig. 3.21a). El equipo se posiciona a una distancia desde el cabezal sensor hasta el objeto de 45 mm por medio de un tornillo micrométrico, y un indicador de señal que ayuda a encontrar el centro del rango. El láser transmisor y el sensor receptor aseguran una resolución de deformación de 5×10^{-5} . La superficie de la membrana de látex se ilumina por el haz de luz emitido por el cabezal del sensor (diámetro del punto luminoso de 1.0 mm), el cual cruza la cámara de metacrilato de 15 mm de espesor y 25 mm de un fluido de confinamiento (aire o aceite de silicona). Para un mejor reflejo, se recomienda cubrir la parte de la membrana con una delgada capa de pintura acrílica blanca, y mantener la superficie de color en ensayos de larga duración. En la investigación se usó aire como fluido de confinamiento. Romero (1999) presenta curvas de calibración de estos sensores a diferentes cambios de temperatura, teniendo como fluido de confinamiento, aceite de silicona.

Otra novedad del equipo triaxial es que los sensores externos de medida lateral pueden desplazarse verticalmente a lo largo de toda la altura de la probeta por medio de un motor eléctrico (No 15, Fig. 3.21a), el cual actúa sobre el sistema de desplazamiento vertical de los sensores a una velocidad aproximada de 2.6 mm/s. Con este método, todo el perfil de la muestra desde el pedestal hasta el cabezal puede recorrerse en aproximadamente 30 s, y medido con la misma resolución de deformación. El desplazamiento vertical de los sensores ópticos laterales se miden con dos LVDTs fijos en el exterior de la cámara (No 5, Fig. 3.21a), con un rango de 100 mm, sensibilidad alrededor de 50 mV/mm con una resolución de 50 σ m (en la Fig. 3.28 se presenta el gráfico de calibración de los LVDTs externos). Estas medidas permiten evaluar el cambio de volumen global de la probeta. Adicionalmente, algunas no-uniformidades de la muestra e incertidumbres tales como pequeñas inclinaciones de la muestra, las constricciones del cabezal y pedestal, las irregularidades de la superficie de la membrana, pueden ser fácilmente detectados por estos sensores láser.

Se realizaron calibraciones con objeto de investigar el efecto de refracción, así como comprobar la señal de salida debido a los diferentes medios transparentes que interfieren entre el cabezal sensor y la superficie de objeto. Cualquier objeto que refracte, refleje o disminuya la intensidad del haz de luz, incluyendo polvo, puede causar errores de interferencia lo cual afecta la señal. En la figura 3.27b se representa el efecto de refracción sobre la respuesta al sensor; por tal motivo, es importante realizar la calibración de los sensores usando el mismo esquema de montaje de ensayo. Antes de la calibración de los sensores láser, se realizaron ajustes de la salida de la señal eléctrica (Fig. 3.29). Una vez que la salida de la señal fuera estable, se procedió a la calibración de los sensores. El procedimiento consistió en el uso de un micrómetro certificado de alta resolución (0.001 – 5 mm), posicionándolo en contacto con el cabezal sensor, usando como probeta un cilindro de acero inoxidable cubierto con las membranas de látex, siguiendo el mismo esquema requerido para los ensayos. Los ciclos de calibración se realizaron desplazando el cabezal sensor con respecto a un punto fijo del objeto. En la figura 3.29 se muestra una adecuada linealidad para los dos medios transparentes aire–metacrilato–aire.

Al incrementar la presión de confinamiento (ω_b), se inducen movimientos hacia fuera del metacrilato, a pesar del uso de una cámara de confinamiento de acero inoxidable (Fig. 3.24). Este desplazamiento lateral no-lineal de la cámara de metacrilato influye en un comportamiento de la señal del sensor, debido a la reducción en la distancia (y) en el esquema de la Fig. 3.27b. Los desplazamientos máximos de la cámara de metacrilato son alrededor de $\pm y = - \div x = -80 \sigma$ m (medido a la mitad de la altura de la ventana) a una presión de confinamiento de 2.3 MPa (Fig. 3.30). Debido a que el equipo se sometería a ciclos de carga y descarga, fue necesaria una calibración para verificar los cambios de offset y de sensibilidad. El procedimiento consistió en mantener constante la distancia entre el cabezal sensor y el objeto (probeta falsa de acero inoxidable con membranas de látex), bajo ciclos de presión de confinamiento. Después de un año se realizó una segunda calibración, en la Fig. 3.31 se muestra que el principal factor por corregir en las lecturas es por el error de offset, ya que la sensibilidad de los sensores se mantuvieron constantes.

3.7.2.3 Esfuerzo vertical. Célula de carga

El esfuerzo axial se aplica por medio de una cámara de presión (identificada con el No 7, Fig. 3.21a). El pistón inferior de carga conectado a un segundo pistón superior (No 19, Fig. 3.21a) con el mismo diámetro de la muestra, prevé la independencia del esfuerzo vertical de la presión de cámara. La

presión de cámara inferior, referida como presión de pistón (ω_p), es impuesta por medio de un pistón roscable controlado por un motor de corriente continua con reductor, desarrollado en el Laboratorio de Geotecnia. Este sistema acoplado a la cámara inferior del equipo triaxial permite controlar el desplazamiento del pistón de carga (Fig. 3.32). La calibración para establecer la relación entre la velocidad del motor reductor y el desplazamiento del pistón de carga se presenta en la Fig. 3.33. Este diseño permite ensayos de esfuerzo controlado o deformación controlada. En el programa de ensayos en esta investigación se optó por ensayos, bajo deformación controlada.

Sivakumar (1993), haciendo uso de una expresión presentada por Bishop y Henkel (1962) para obtener una velocidad de corte con un 95 % de equilibrio en ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas (ec 3.12), obtuvo un tiempo para llegar a la falla de 11 días de ensayos triaxiales en muestras de caolín en condiciones no saturadas, donde la deformación de falla fue de 20 a 35 % a una velocidad de desplazamiento de 1.2 σ m/min. Se tomó como base dicha ecuación para estimar el tiempo para llegar a la falla en el programa de ensayos triaxiales en muestras no saturadas del suelo en estudio (arcilla de baja plasticidad).

$$c_v \mid \frac{K}{v_w m_v} ; \quad m_v \mid \frac{\div \kappa}{\div \omega}$$

$$t \mid \frac{20 h^2}{0.75 c_v} \tag{3.12}$$

Donde $K = 2.6 \times 10^{-9}$ (m/s), permeabilidad del suelo al agua obtenido de los ensayos de colapso con control de succión; $m_v = 0.005$ (m^2/kN), compresibilidad del suelo, de los ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas; $v_w = 9.8$ (kN/m^3), densidad del agua; $2h = 0.076$ m, altura de la muestra; $c_v = 5.2 \times 10^{-8}$ (m^2/s), coeficiente de consolidación de los ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas y, t , el tiempo de falla.

Por sustitución de los valores, el tiempo de falla fue aproximadamente de 8.5 días, bajo condiciones drenadas. Sin embargo, dado que la permeabilidad no saturada es menor que la saturada, se optó por un tiempo de falla de alrededor de 12 días, logrando una deformación axial (κ_f) de falla entre 18 y 25 %, a una velocidad constante de desplazamiento de 1.0 σ m/min, con objeto de garantizar la succión constante ($s = u_a - u_w$) en toda la trayectoria de falla. Dicha velocidad se comprobó que no generaba presiones de poro al parar el motor reductor por un periodo de 36 horas, ya que no se observó cambios en la deformación de la muestra ni alteraciones en los contenidos de agua.

Una junta tórica (67 mm diámetro interior x 2 mm de grosor) en el pistón inferior de carga, y otra junta tórica (38 mm diámetro interior x 2 mm de grosor) en el pistón superior de carga, aíslan la presión de confinamiento (ω_c) sobre la muestra de la presión de la cámara de carga (ω_c) durante la imposición del desviador (ω_l) (Figs. 3.21a, 3.32). La relación entre ω_l y ω_p dependerá de los siguientes factores:

- ∉ Superficie (a) de aplicación de ω_p en la cámara inferior de carga
- ∉ Peso (w) del pistón de carga
- ∉ Área de la muestra (A)

Se obtendrá en consecuencia, una relación entre ω_l y ω_p del tipo:

$$\begin{aligned}
 F &| A\omega_1 4 A\omega_3 ; \quad R_1 | \frac{a}{A} \\
 F 2 w &| a\omega_p 4 A\omega_3 ; \quad A\omega_1 4 A\omega_3 2 w | a\omega_p 4 A\omega_3 \\
 \omega_1 &| \omega_p R_1 4 \frac{w}{A}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

El pedestal y los pistones de carga, fueron pesados al comenzar los ensayos, por tanto la ecuación 3.13 es mejor se exprese en forma de incremento:

$$\left. \begin{aligned}
 \div \omega_1 &| \div \omega_p R_1 | \div \omega_3 2 \div \frac{\textcircled{R}F}{\textcircled{TM}A} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Que permite relacionar directamente el cambio de ω_l al variar ω_p , donde $A = 11.34 \text{ cm}^2$, $a = 33.87 \text{ cm}^2$, por tanto, $R_1 = 2.99$.

En la Fig. 3.34 se comparan los datos teóricos de la ecuación 3.14 con datos de una calibración realizando ciclos de incrementos de presión de cámara (ω_b), obteniendo así, una relación experimental de $\div \omega_l = 2.96 \div \omega_p$. De igual manera, en la Fig. 3.35 se comprueba experimentalmente por medio de calibraciones, la expresión en la ecuación (3.14). Para obtener de ω_l se utilizó una célula de carga (SENSOTEC) compensada ante cambios de presión y con una capacidad de 8.9 kN, acoplada al equipo por encima de la muestra (Fig. 3.21a, 3.22). Esta célula de carga contiene dos diafragmas de acero inoxidable, soldados en los extremos del elemento activo para proteger la célula de carga de los efectos de descentralización de la carga axial (Fig. 3.36).

La célula de carga se adquirió con un certificado de calibración de SENSOTEC. Para comprobar los datos especificados, se realizó una calibración eléctrica, situando un resistor de precisión en los terminales apropiados (generalmente excitación y salida). En la Fig. 3.34 se presenta la sensibilidad de la señal de salida de la célula en (mV), a un valor de fuerza en (kN).

Otra característica de la célula de carga que se comprobó, fue su estabilidad frente a incrementos de presión de confinamiento (ω_b). En la Fig. 3.37 aparece la evolución temporal de la señal eléctrica (mV) de la célula de carga durante un ciclo de carga–descarga de la presión de confinamiento, observando que la respuesta de la célula de carga no se ve afectada por lo cambios de presión.

Con la obtención de ω_1 , medido con la célula de carga, se obtiene directamente la fuerza (F) ejercida en la muestra. Una vez conocido F, se debe conocer el esfuerzo desviador (q) dividiendo dicho valor por el área de la sección de la probeta; dicha área deberá ser corregida debido a los cambios de la deformación volumétrica en la muestra.

$$\left. \begin{aligned}
 A_c &| A_0 \left(\frac{\textcircled{R} 4 \kappa_v}{\textcircled{TM} 4 \kappa_l} \right) \right\} ; \quad q | \frac{F}{A_c}
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Siendo A_0 el área inicial, y A_c el área corregida de la sección de la probeta; $\kappa_v = \kappa_l + 2 \kappa_r$ deformación volumétrica y deformación axial κ_l y radial κ_r .

3.7.3 Sistema de adquisición de datos

El registro de datos se realizó con un sistema de control y adquisición de datos Keithley System 570, y un convertidor A/D de 12 bit (resolución del sistema 1/4096), conectado a un ordenador PC, IBM. La entrada analógica varía entre ± 10 Vdc con resolución de 4.88 mV. Los rangos analógicos de entrada y el acondicionamiento de señal de ganancia proveen una resolución menor a 0.122 mV. El sistema ofrece 16 canales de entrada diferencial, un tiempo de conversión de 25 μ s, y un tiempo de adquisición de muestra de 5 μ s a una velocidad de 35 kHz.

El preacondicionamiento y señales amplificadas incrementan la resolución (control de ganancia, y posicionamiento a cero) de las diferentes unidades externas, el cual alimenta a 14 transductores (dos LVDTs miniatura internos; dos sensores de desplazamiento láser; una célula de carga; dos termopares internos; dos LVDTs externos para monitorear el desplazamiento vertical de los sensores láser; un LVDT para monitorear el desplazamiento del pistón de carga, y cuatro transductores de presión). Las unidades controladoras presentan sus lecturas en una pantalla, que permite una visualización on-line de las diferentes medidas, o el desplazamiento a cero cuando es necesario durante el ensayo. El rango del convertidor global A/C es de 0 a 10 Vdc. El amplificador global de la instrumentación ha sido seleccionado en 1. Además, seleccionando desde el software pueden programarse diferentes amplificadores de ganancia local de 1 y 2. La ventaja de aplicar una ganancia es que se puede incrementar la entrada de voltaje antes de ser digitalizado por el convertidor A/D, mejorando la resolución de las medidas (Tabla 3.3). Por otro lado, se detectaron algunos ruidos en las señales por lo que se utilizó un máximo de 14 canales, algunas veces con una señal de nivel bajo, de menos de 1 Vcd, y dos cables conectados a canales diferenciales de entrada (positivo y negativo). En la Fig. 3.29 se observa cómo para el sensor láser 2, la señal se ajusta, minimizando el ruido de la señal. Se realizaron calibraciones de resolución de señal tanto de los sensores láser como de los LVDTs internos (combinando amplificador y convertidor A/D), presentando una buena resolución.

Dos programas en lenguaje KDAC5001/I se utilizaron para el registro de datos. El principal programa es aquel que interpreta los registros de salida de voltaje de los diferentes transductores a cierto intervalo de tiempo convirtiéndolos en unidades ingenieriles. Este programa fue el utilizado para la adquisición de datos en ensayos isótropos y triaxiales en trayectorias de carga - descarga, mojado - secado y rotura. El segundo programa se usó para registrar los datos de los sensores láser y LVDTs externos al realizar medidas laterales del perfil de la muestra. Cada dato registrado en un intervalo de tiempo, es salvado en el disco duro para su posterior análisis. Los intervalos de tiempo son especificados en el software antes de comenzar el ensayo. Los intervalos de tiempo de toma de registro varían entre 0.01 min y 74 min en el caso del primer programa (programa principal) y en el segundo programa entre 0.002 s y 30 s. En este último programa se requiere una velocidad alta de toma de registro, ya que es el utilizado para medir de los perfiles laterales de la muestra.

Un tiempo convencional en cada intervalo de toma de registro usado en ensayos largos en tiempo fue, alrededor de 10 min y un intervalo de tiempo usual para la toma de datos del perfil de la muestra de 0.1 s, lo cual corresponde a 300 lecturas en 30 s, tiempo requerido para desplazar verticalmente el sensor láser en toda la altura de la muestra. Los datos salvados en cada intervalo de tiempo en el disco duro, también pueden ser copiados a un disquete sin necesidad de parar el ensayo. En la Tabla 3.3 se presentan los valores obtenidos para una buena resolución del convertidor A/D.

Tabla 3.3 Descripción de los canales de los diferentes transductores.

Canal	Parámetro medido	Ganancia (voltaje de entrada)	Sensibilidad de operación	Resolución
	#			
0: LVDT-pistón	$\kappa_{l(g)}$	2 (0 a 5V)	4.0 $\sigma\text{m/mV}$	1.0 σm
1: Presión de aire	u_a	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
2: Presión de conf.	ω_c	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
3: Pres. agua	u_w	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
4: LVDT-int.-1	$\kappa_{l(c)}$	2 (0 a 5V)	0.299 $\sigma\text{m/mV}$	0.6 σm
5: LVDT-int.-2	$\kappa_{l(c)}$	2 (0 a 5V)	0.30 $\sigma\text{m/mV}$	0.6 σm
6: Láser 1	$\kappa_{r(c)}$	2 (0 a 5V)	85.7 $\sigma\text{m/mV}$	2.0 σm
7: Láser 2	$\kappa_{r(c)}$	2 (0 a 5V)	85.9 $\sigma\text{m/mV}$	2.0 σm
8: Célula de carga	ω_l	2 (0 a 5V)	1.78 N/mV	3.5 N
9: LVDT-ext.-1	κ_{l-r}	2 (0 a 5V)	97.7 $\sigma\text{m/mV}$	50 σm
10: LVDT-ext.-2	κ_{l-r}	2 (0 a 5V)	97.5 $\sigma\text{m/mV}$	50 σm
11: Pres. cámara inf.	ω_p	1 (0 a 10V)	0.20 kPa/mV	1.0 kPa
12: Termopar-int.-sup.	T ($^{\circ}\text{C}$)		0.0126 $^{\circ}\text{C/mV}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
13: Termopar-int.-inf.	T ($^{\circ}\text{C}$)		0.0126 $^{\circ}\text{C/mV}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$

(c) = medida local; (g) = medida global; κ_{l-r} = desplazamiento vertical del sensor láser (obtención perfil lateral de la muestra).

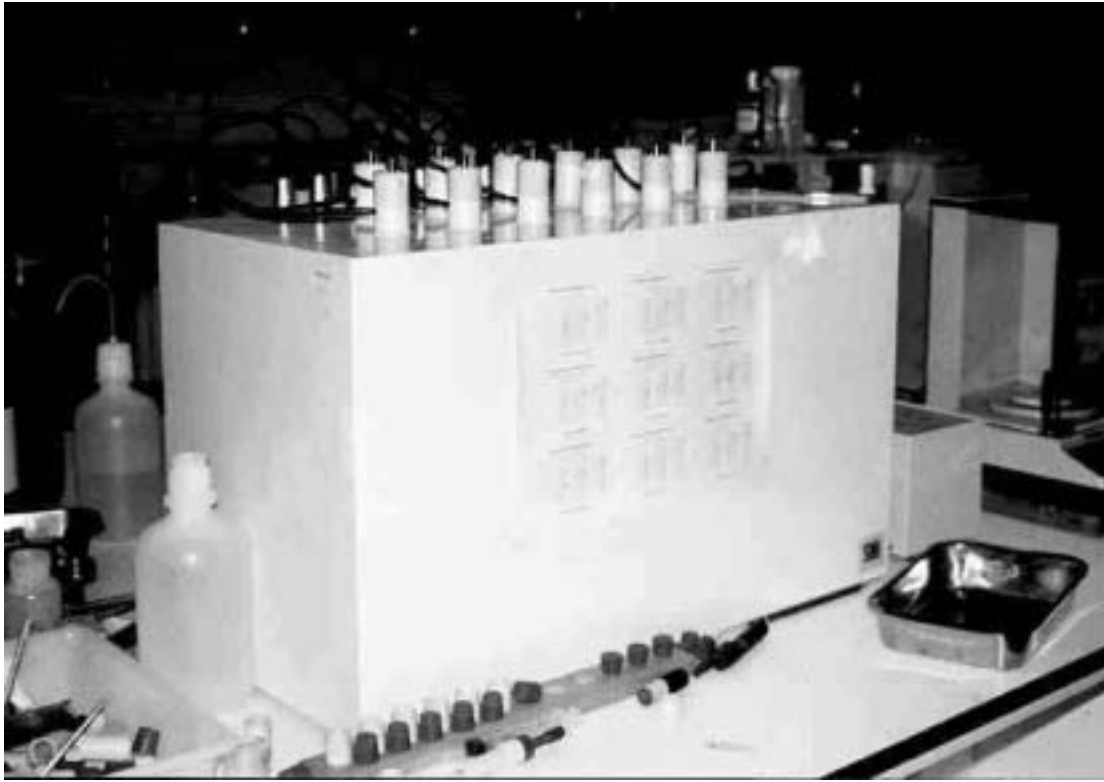


Figura 3.1 Aislador térmico, con las sondas psicrométricas en serie.

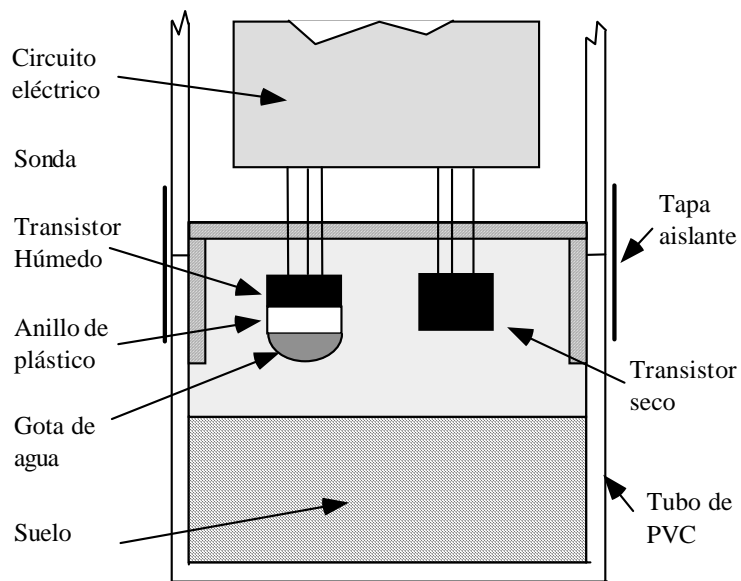


Figura 3.2a Parte inferior de la sonda, y sus elementos.

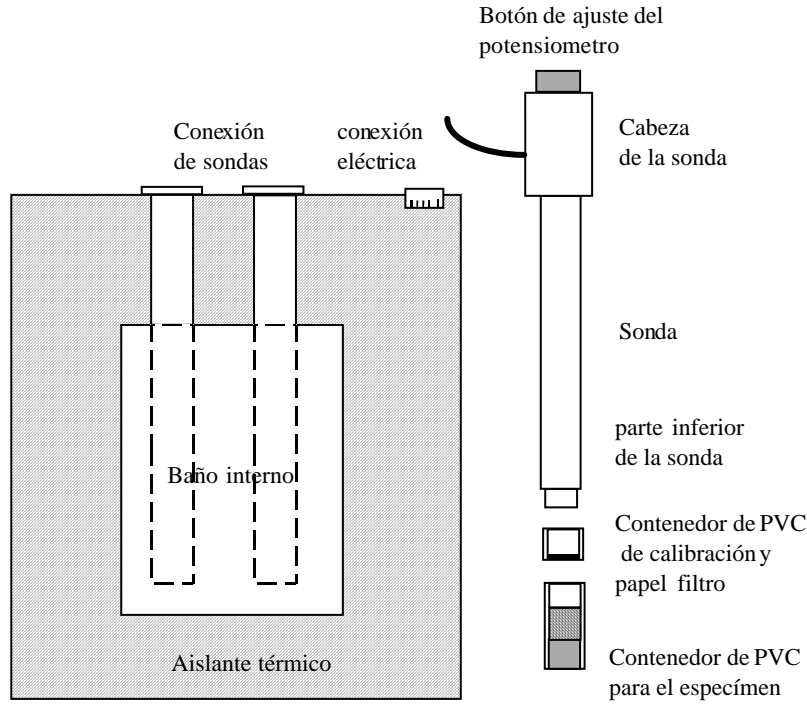


Figura 3.2b La sonda, y el aislante térmico.

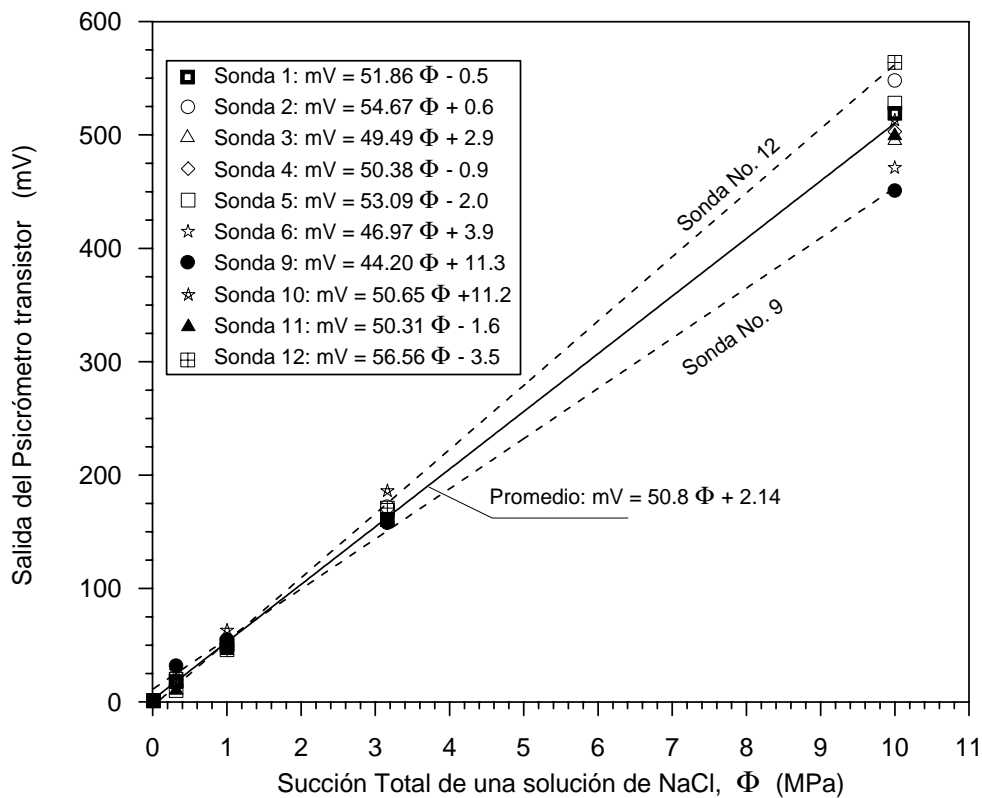


Figura 3.3 Curvas de calibración para las sondas del psicrómetro transistor.

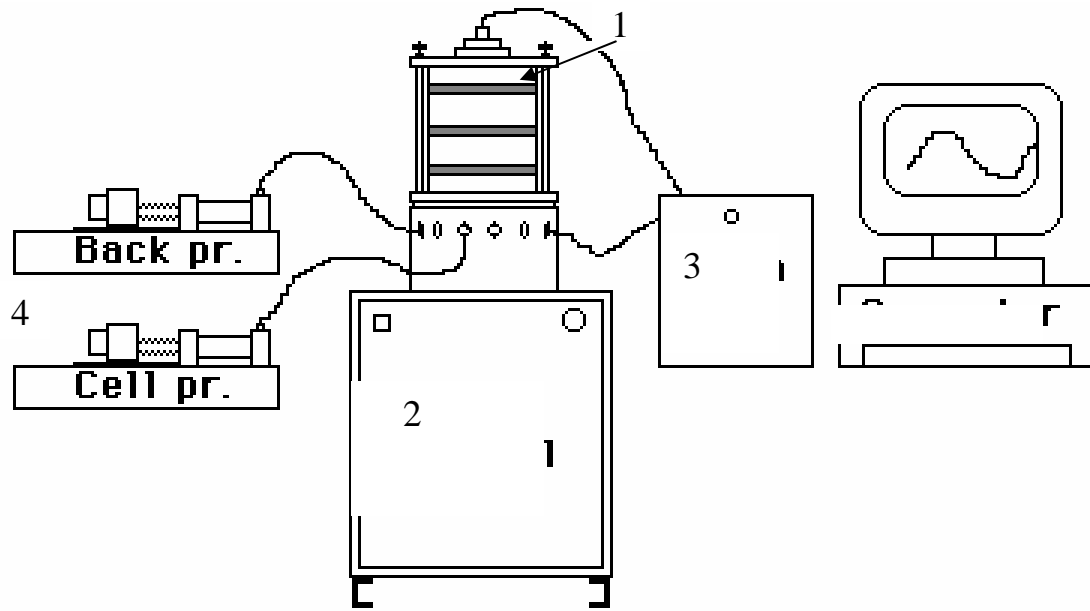


Figura 3.4 Sistema de ensayos triaxiales: 1) célula triaxial; 2) control axial; 3) adquisición de datos y acondicionamiento de señal; 4) controladores digitales de presión y volumen.

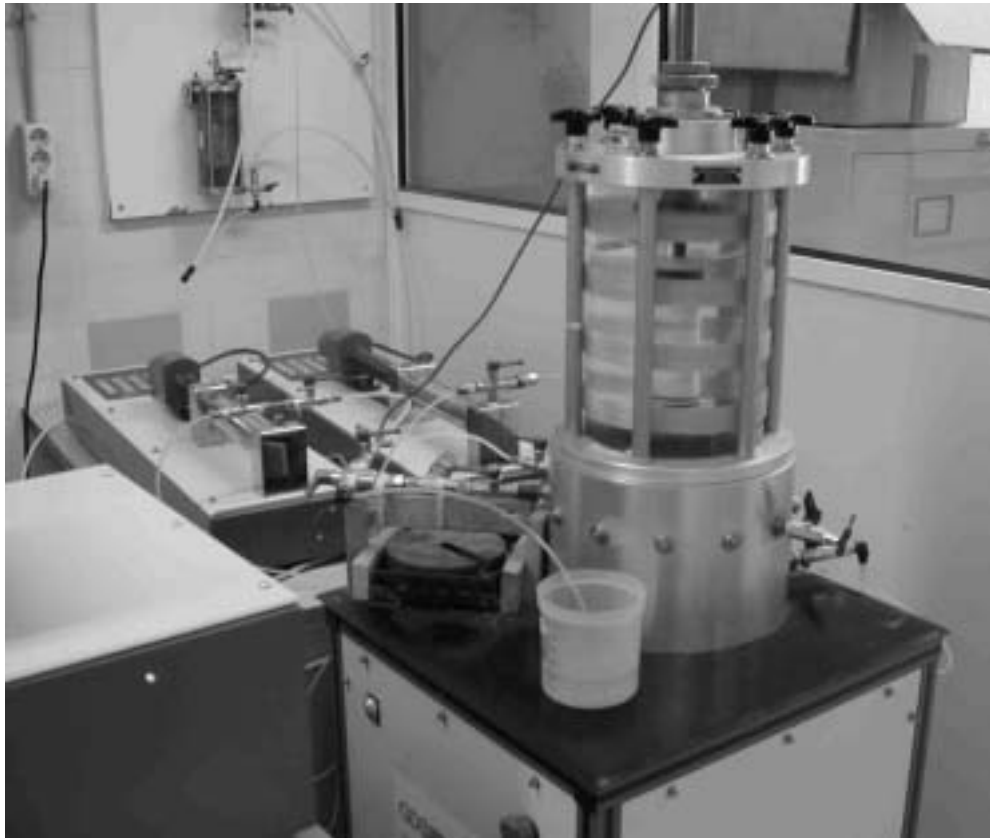


Figura 3.5 Triaxial automático (GDS Instruments Ltd).

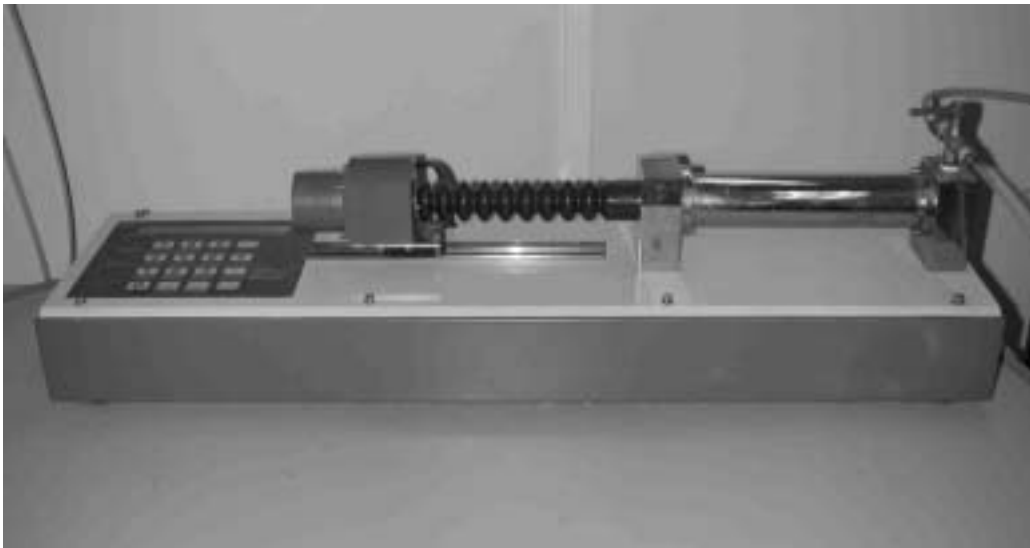


Figura 3.6 Controlador digital de presión y volumen, utilizados para imponer presión de confinamiento y presión de cola.



Figura 3.7 Edómetro con control de succión matricial ($u_a - u_w$), y total (Φ).

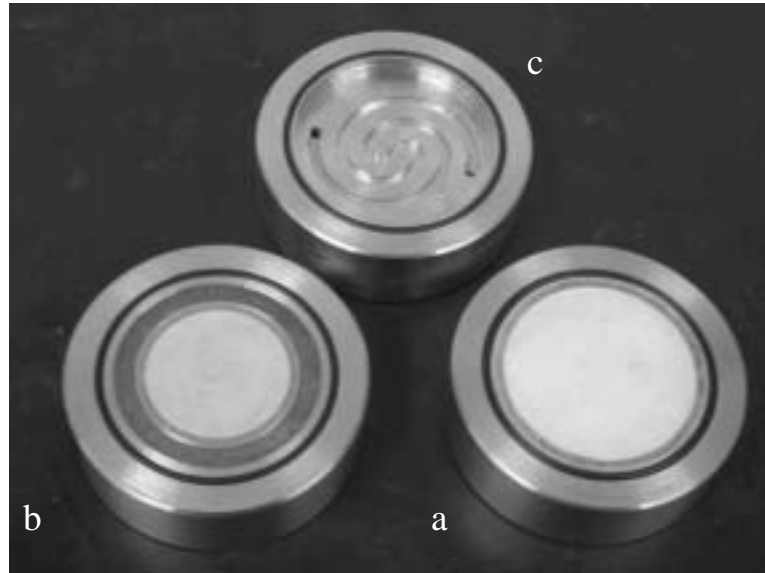


Figura 3.8 a) disco cerámico (AVEA); b) combinación disco cerámico (AVEA) y piedra porosa; c) diseño de la base para la eliminación del aire disuelto a través del disco cerámico, como consecuencia de la técnica de traslación de ejes.

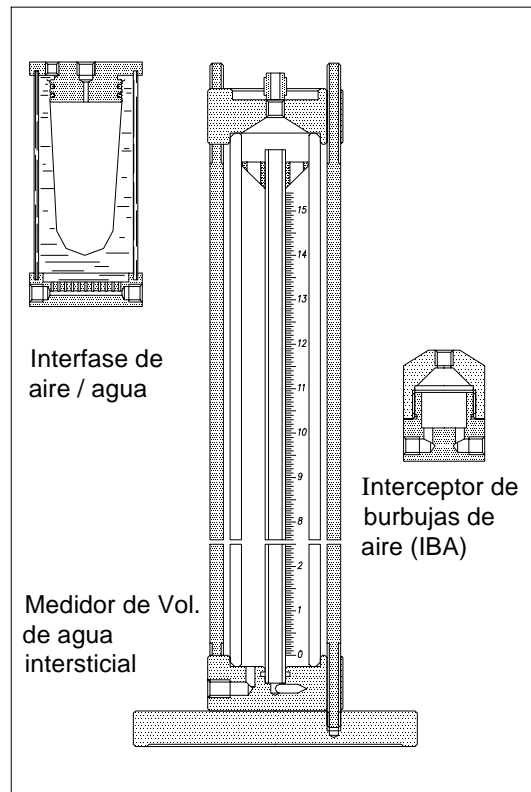
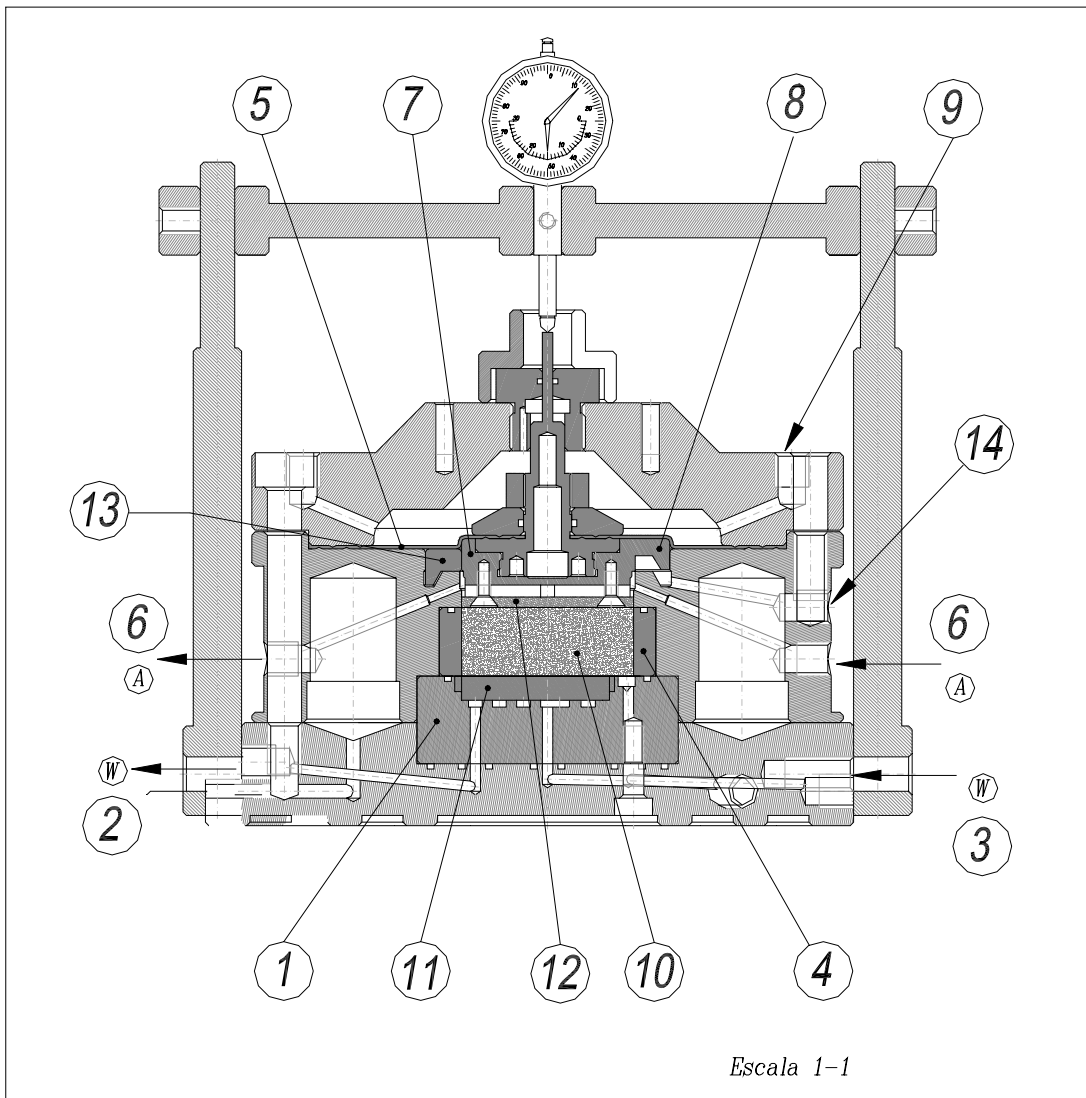


Figura 3.9 Bureta graduada para medir la variación del volumen de agua intersticial, elemento interfase para la aplicación de la presión de agua, e interceptor de burbujas de aire (IBA).



1) pedestal; 2) presión de agua (eliminación de burbujas de aire); 3) presión de agua intersticial; 4) anillo edométrico; 5) membrana de goma impermeable de 1 mm de espesor; 6) control de presión de aire o presión de vapor; 7) pistón de baja presión $\lambda = 50$ mm; 8) pistón de alta presión $\lambda = 71$ mm; 9) presión sobre el diafragma; 10) espécimen de suelo de $\lambda = 50$ mm, y $h = 20$ mm; 11) disco cerámico de alto valor de entrada de aire de 1.5 MPa (AVEA), $\lambda = 50$ mm, y $h = 7.1$ mm; 12) filtro poroso; 13) elemento auxiliar para el pistón de baja presión; 14) salida de agua excedente.

Figura 3.10 Esquema de la nueva célula edométrica con control de succión matricial y total.

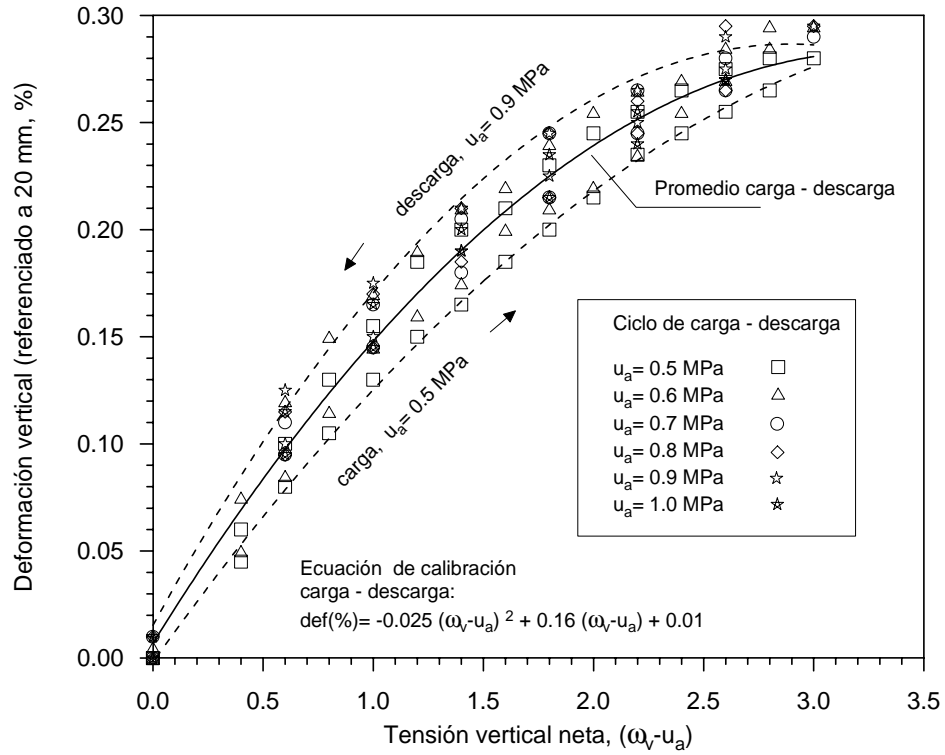


Figura 3.11 Deformación de la nueva célula edométrica con control de succión.

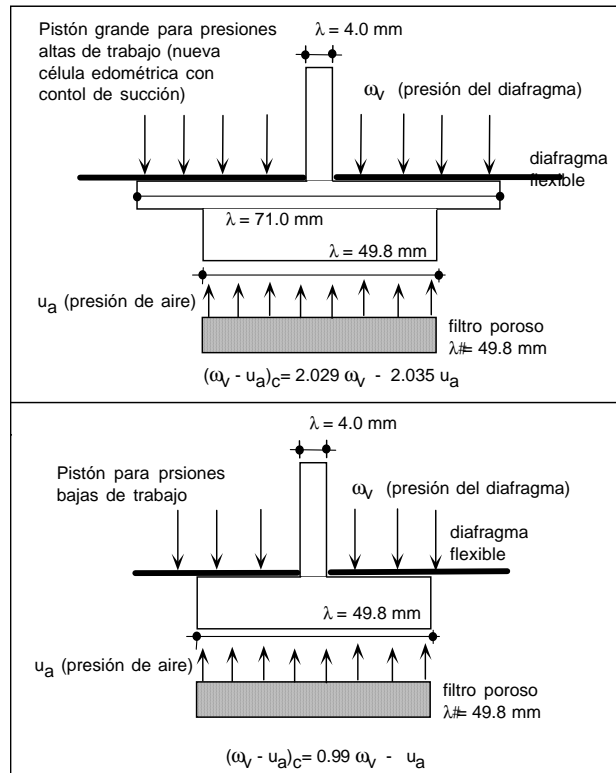


Figura 3.12 Relación teórica entre diafragma, o presión del pistón y carga vertical neta transmitida.

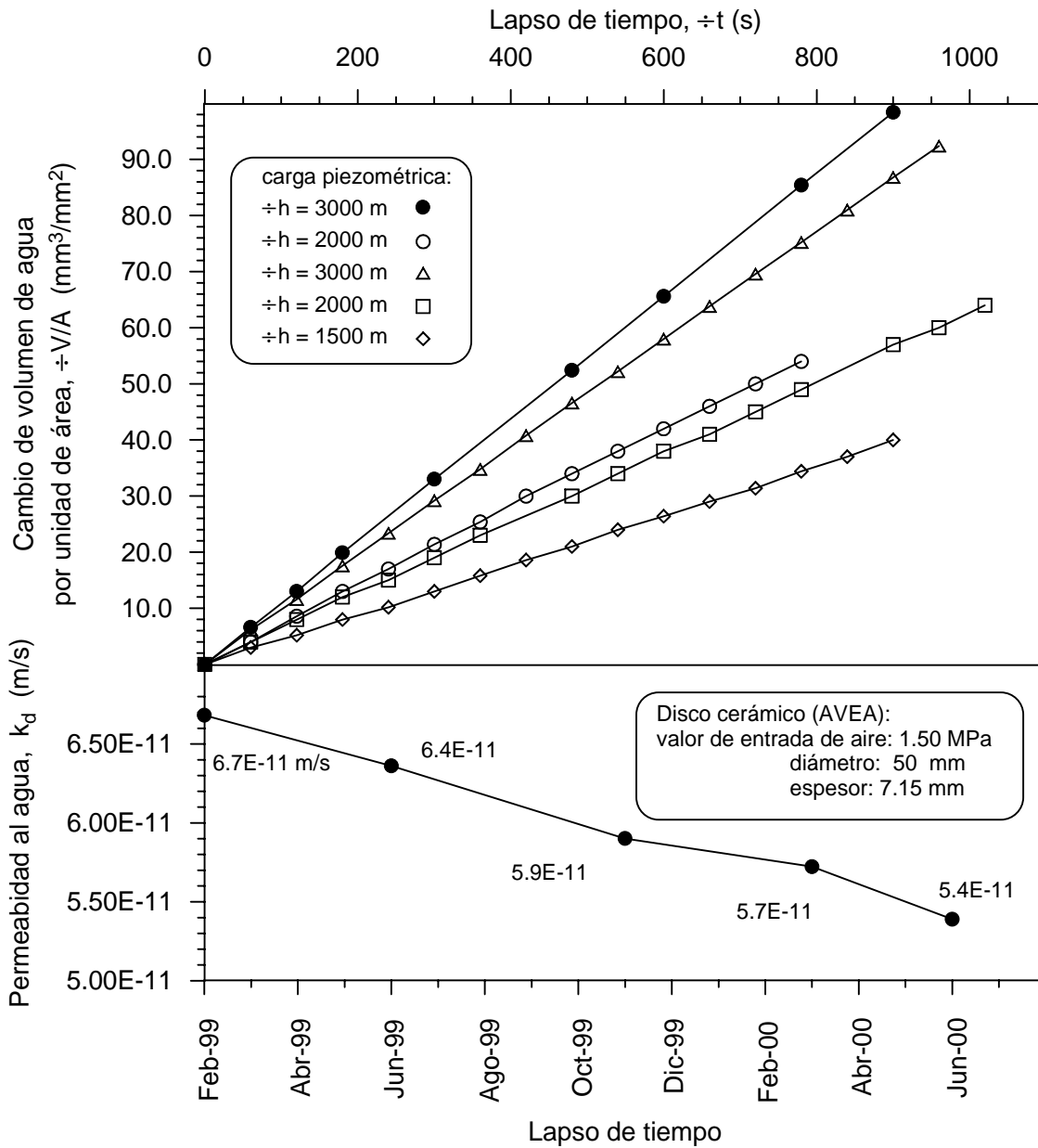


Figura 3.13 Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA:1.5 MPa), (célula edométrica).



Figura 3.14a Piezas especiales para saturación y determinación de la permeabilidad (No 1 y 2) de los discos cerámicos (AVEA) del pedestal y cabezal (célula triaxial con control de succión).

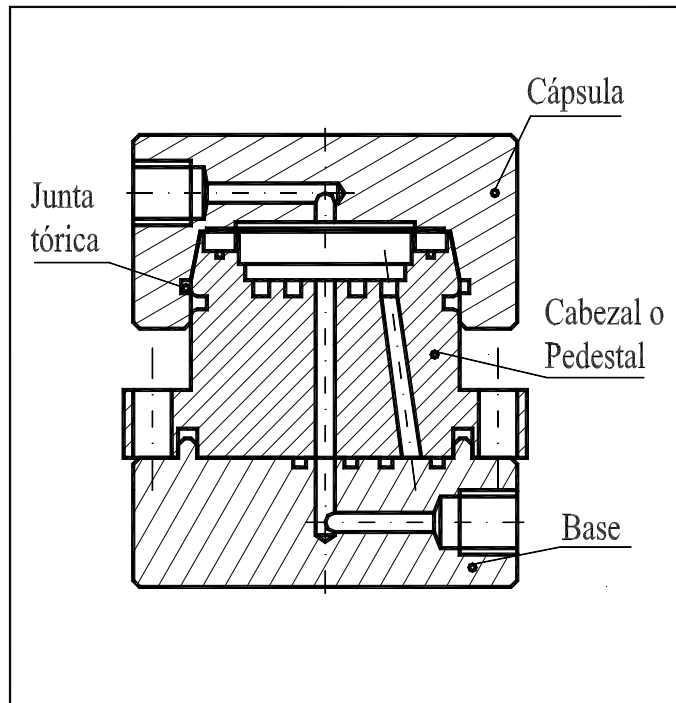


Figura 3.14b Esquema del montaje del cabezal de la célula triaxial para saturar el disco cerámico.

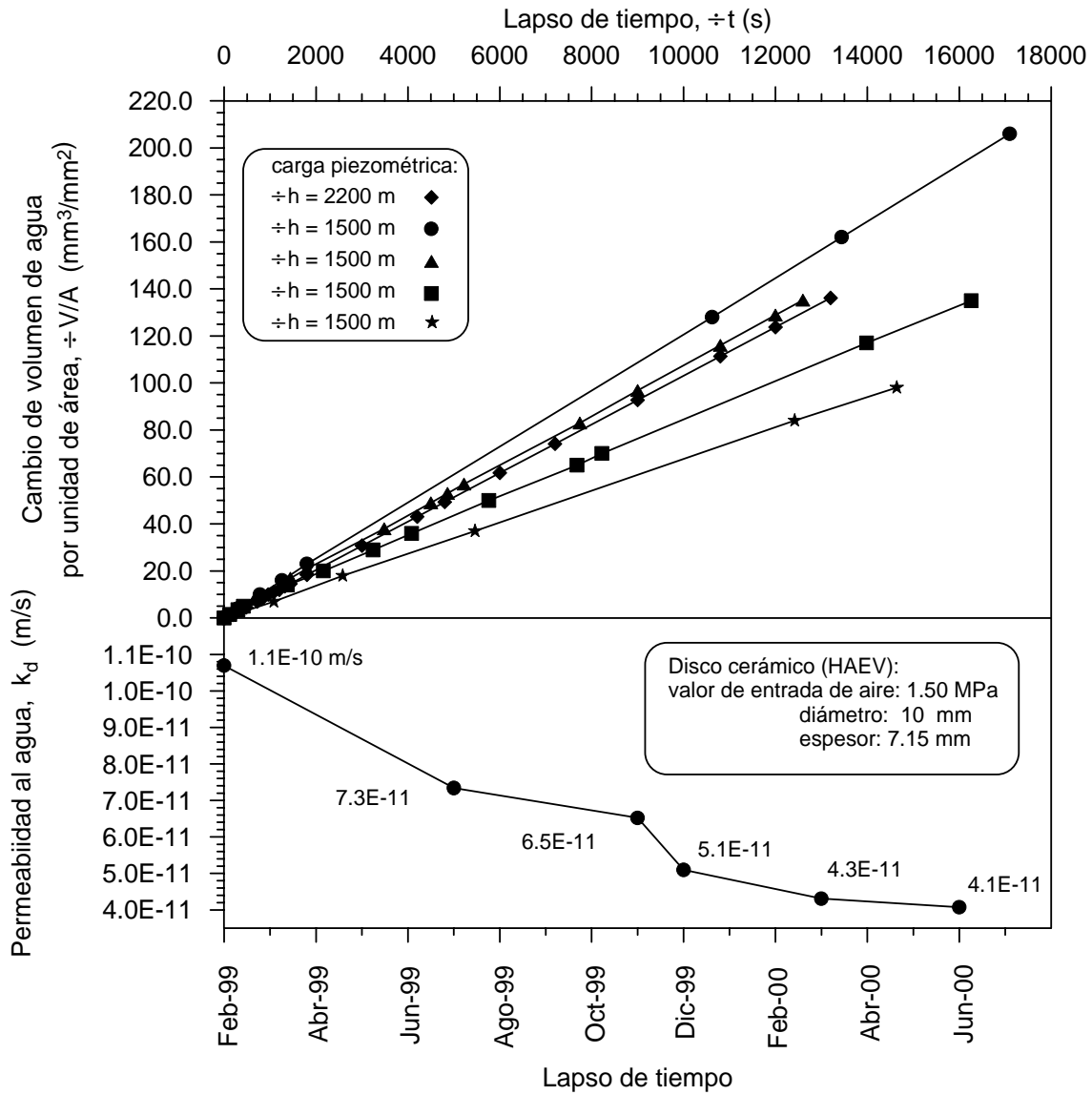


Figura 3.15 Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico (mini-célula isotropa rígida).

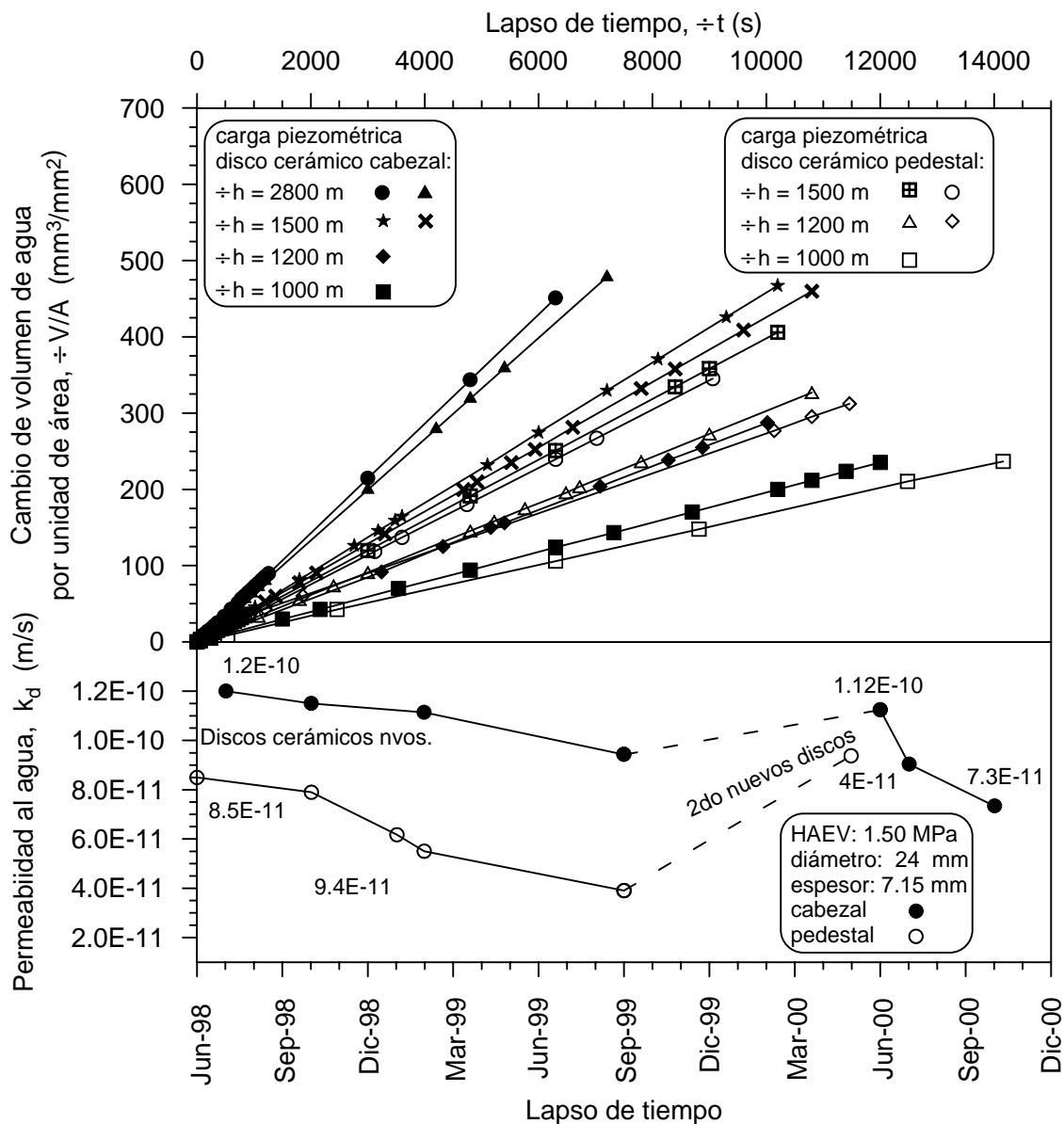


Figura 3.16 Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico del cabezal y pedestal (cámara triaxial con succión controlada).

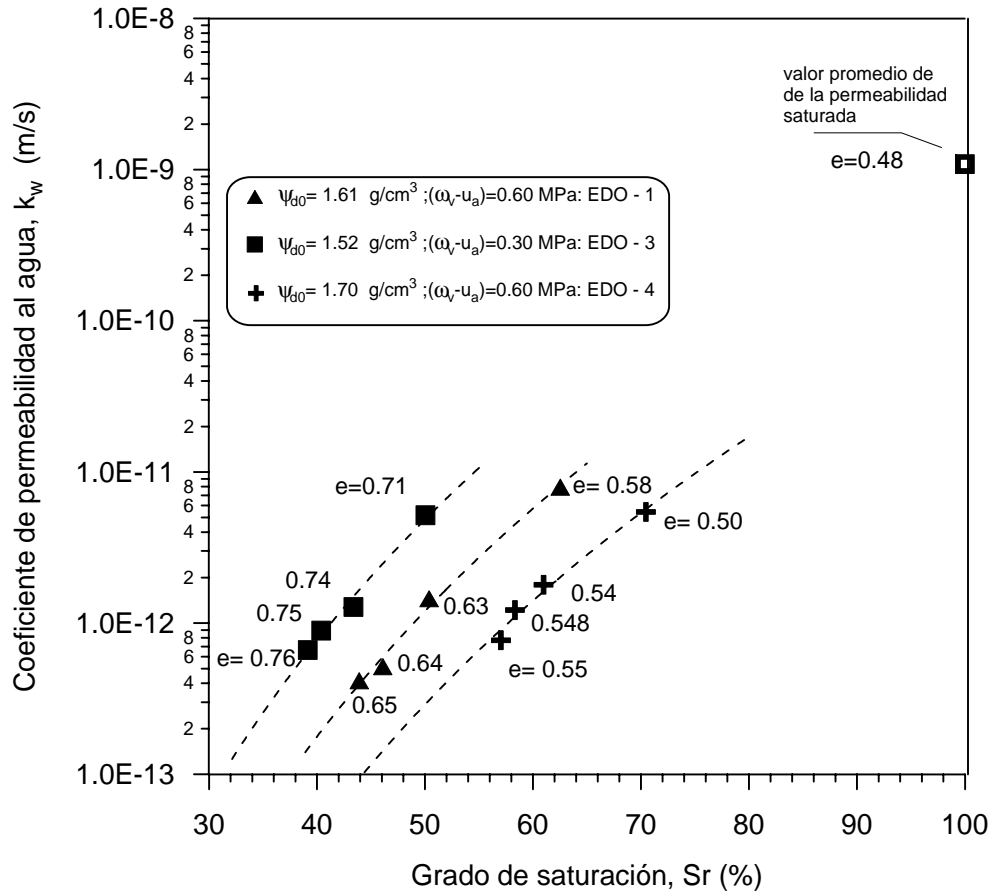


Figura 3.17 Variación de la permeabilidad no saturada en función del grado de saturación al variar la estructura de la arcilla. Ensayos edométricos.

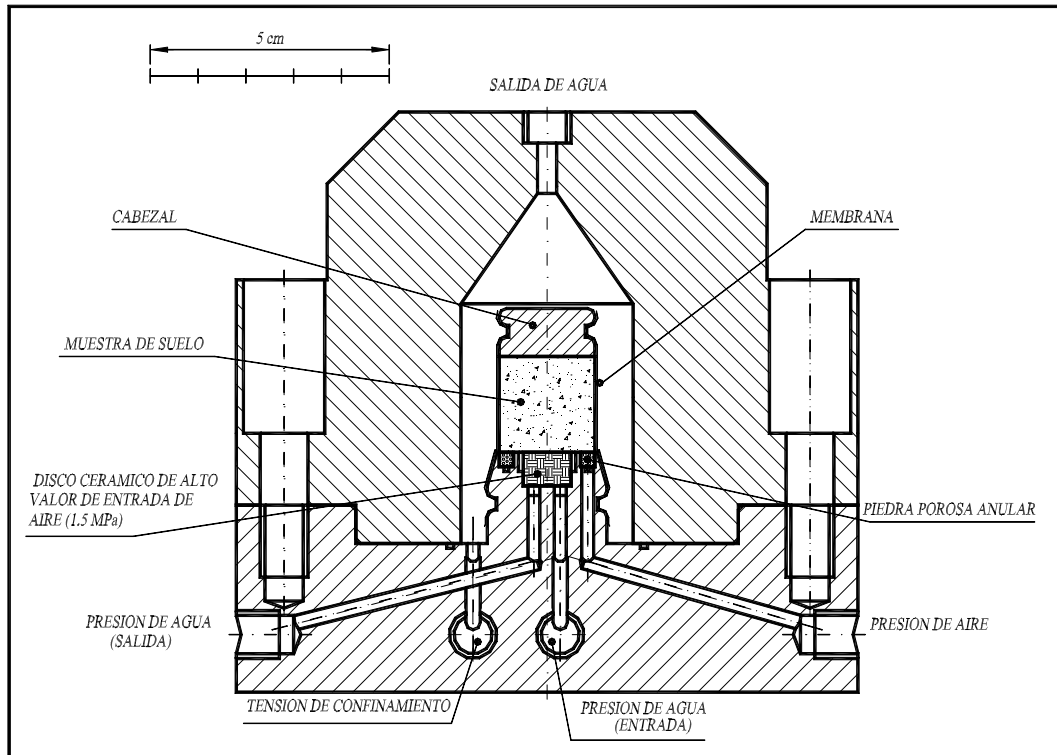


Figura 3.18 Esquema básico de la mini-célula isótropa rígida con control de succión.

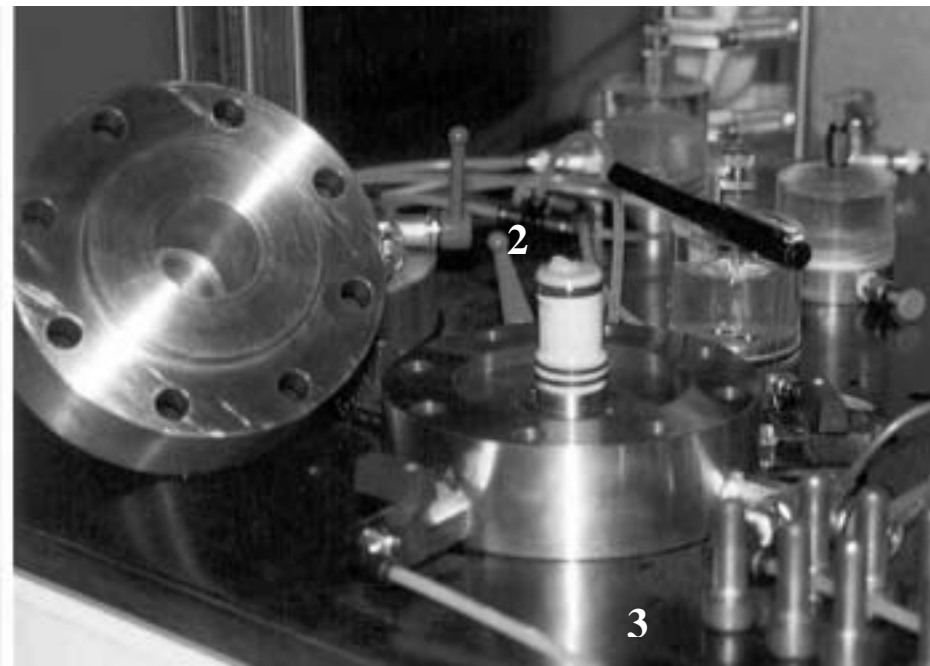


Figura 3.19 1) cuerpo superior (cámara de confinamiento 29, mm de espesor; 2) muestra montada en el pedestal; 3) cuerpo inferior de la mini-célula con control de succión.

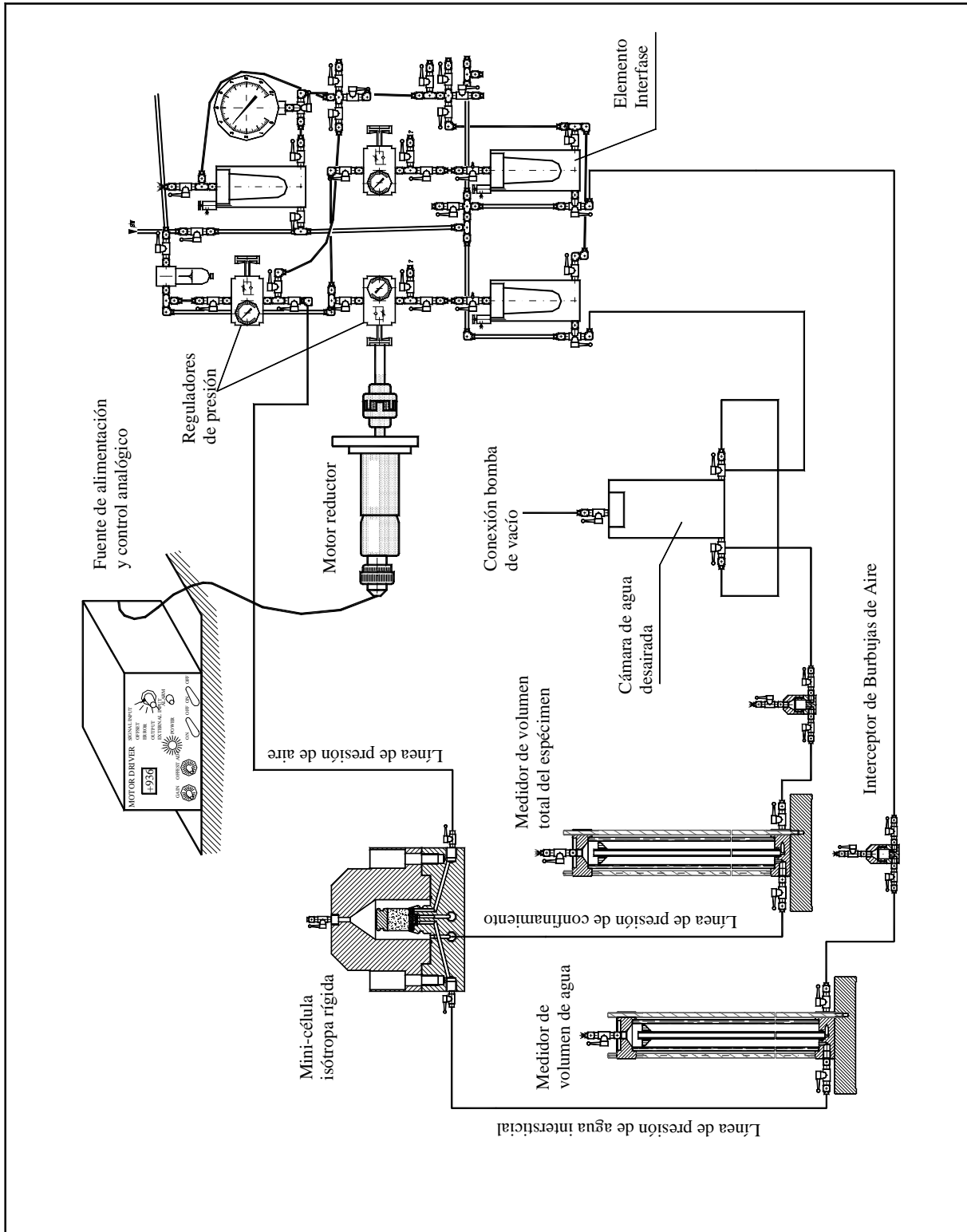
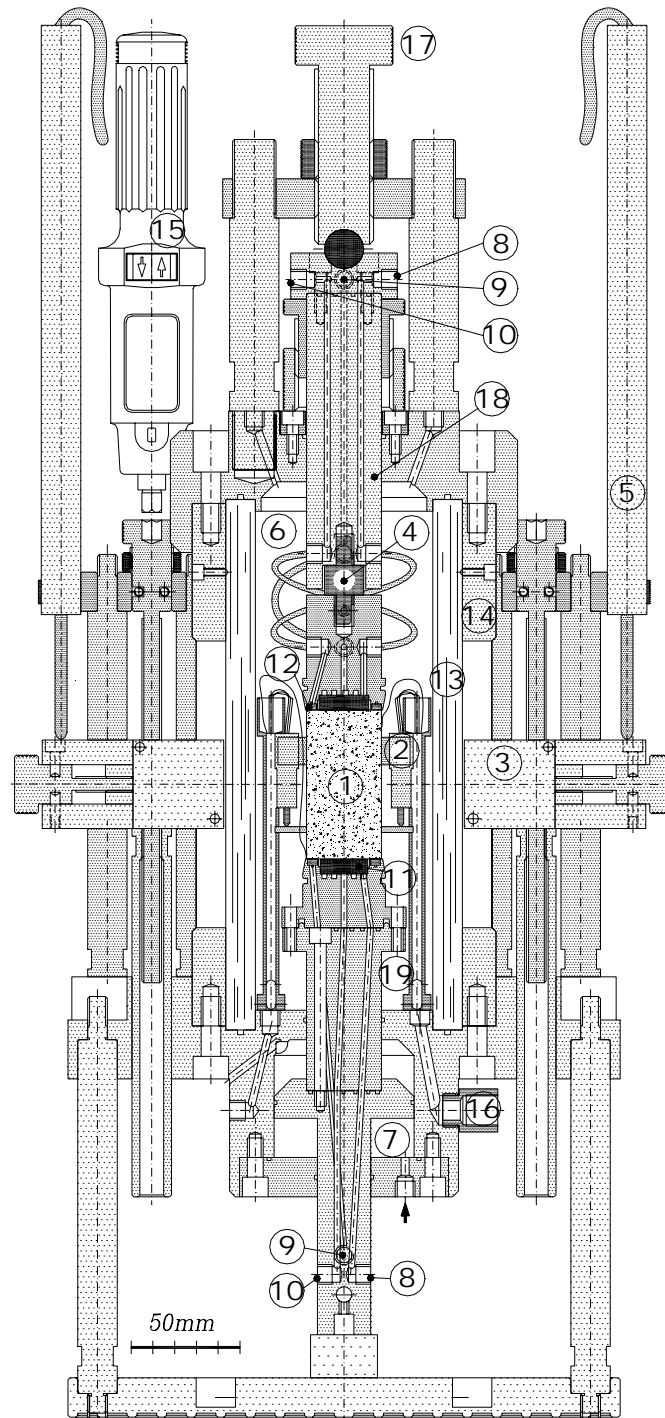


Figura 3.20 Conexiones entre la mini-célula isotrópica básica, y los equipos complementarios.



1) probeta; 2) LVDT (deformación axial); 3) sensor láser (deformación radial); 4) célula de carga; 5) LVDT (desplazamiento vertical del láser); 6) presión de confinamiento (aire/aceite silicona); 7) cámara inferior para aplicar la tensión vertical; 8) presión de aire; 9) presión de agua (al medidor de volumen); 10) presión de agua (al sistema de desaerado); 11) disco cerámico AVEA; 12) anillo poroso; 13) cámara concéntrica de metacrilato; 14) cámara de acero inoxidable; 15) motor de desplazamiento vertical; 16) conexiones al sistema de adquisición de datos; 17) tornillo superior de bloqueo de carga; 18) pistón superior; 19) pistón de carga.

Figura 3.21a Esquema de la célula triaxial con control de succión.



Figura 3.21b Foto de la célula triaxial con control de succión.



a)



b)

Figura 3.22 a) célula de carga roscada entre el cabezal y pistón superior; b) pieza de alineación no-contacto en la ejecución de los ensayos isótropos.

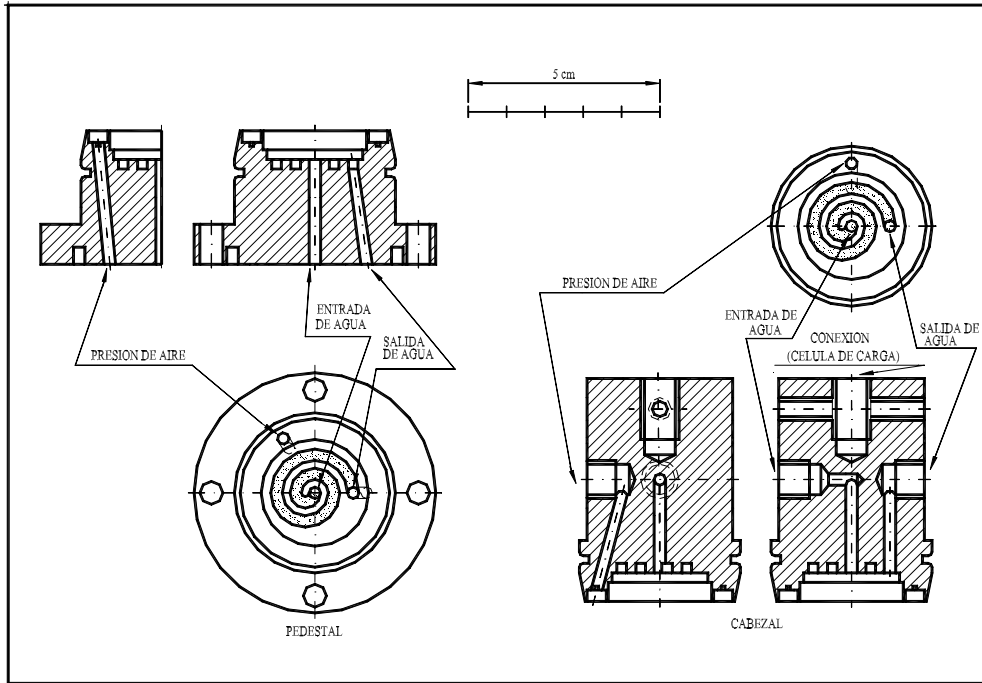


Figura 3.23 Esquema del sistema de aplicación de la presión de aire y agua (combinación del disco cerámico (AVEA), y anillo poroso).



Figura 3.24 Cámara y tapa de la célula triaxial, con control de succión.

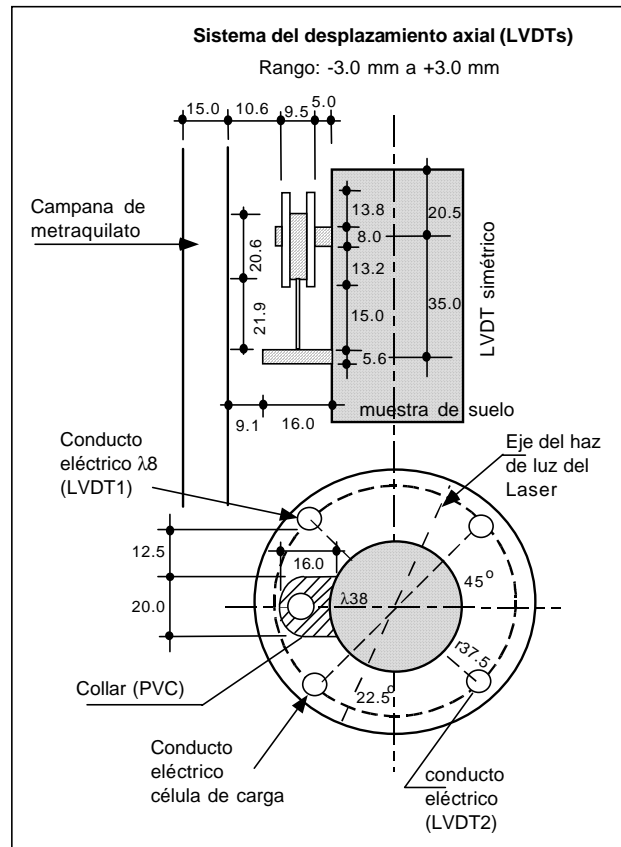


Figura 3.25 Esquema del montaje de los LVDTs miniatura internos.

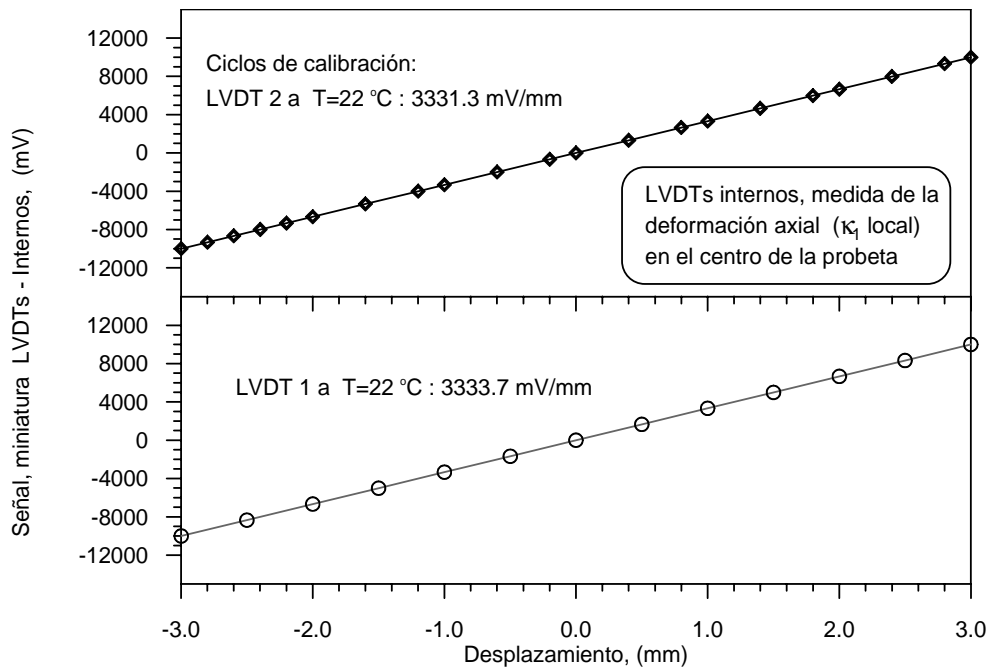


Figura 3.26 Calibración de los LVDTs miniatura internos.

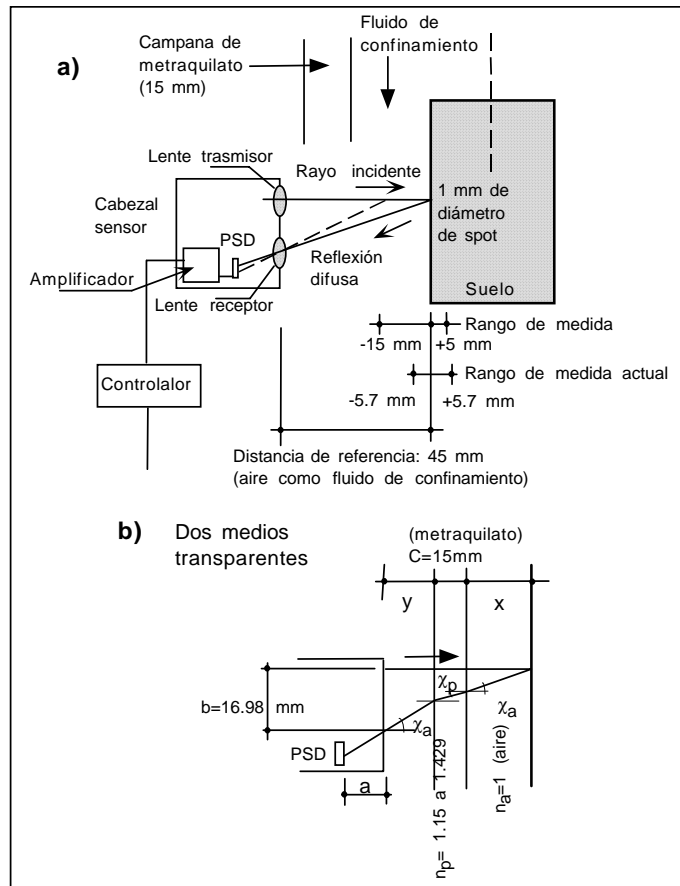


Figura 3.27 a) esquema del cabezal sensor de deformación radial, y técnica de triangulación óptica; b) efecto de la refracción sobre el cabezal sensor (Romero, 1999).

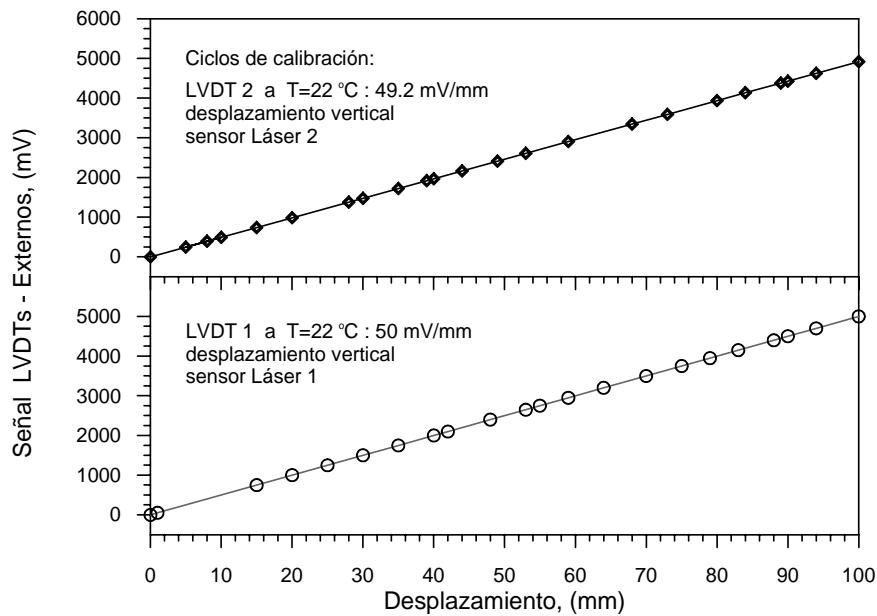


Figura 3.28 Calibración LVDTs externos (desplazamiento vertical de los sensores láser).

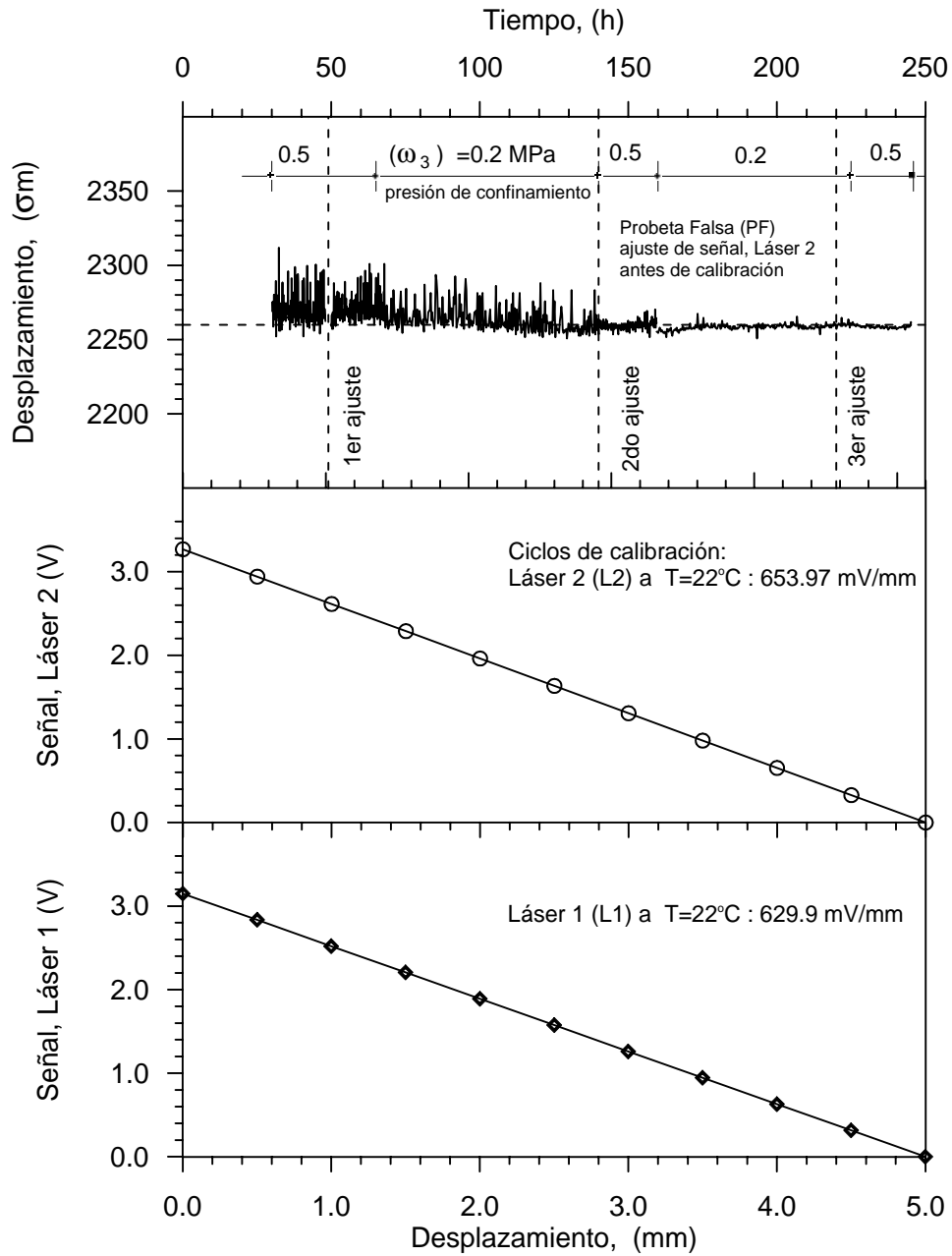


Figura 3.29 Ajuste de la salida de señal eléctrica antes de realizar el programa de calibración de los sensores láser.

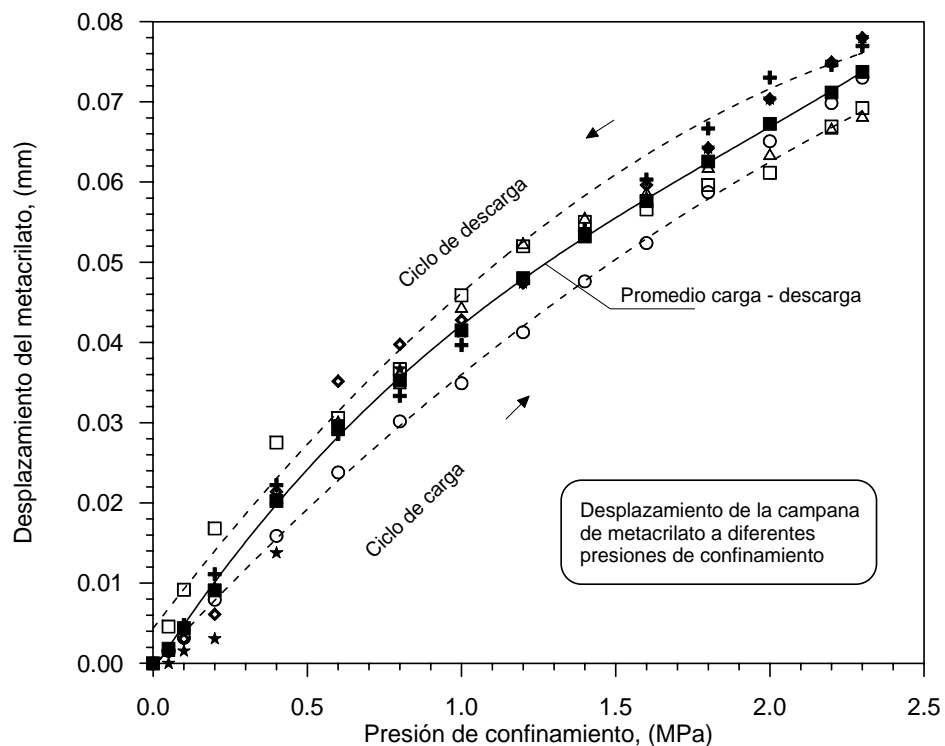


Figura 3.30 Deformación de la cámara de metacrilato, bajo presiones de confinamiento.

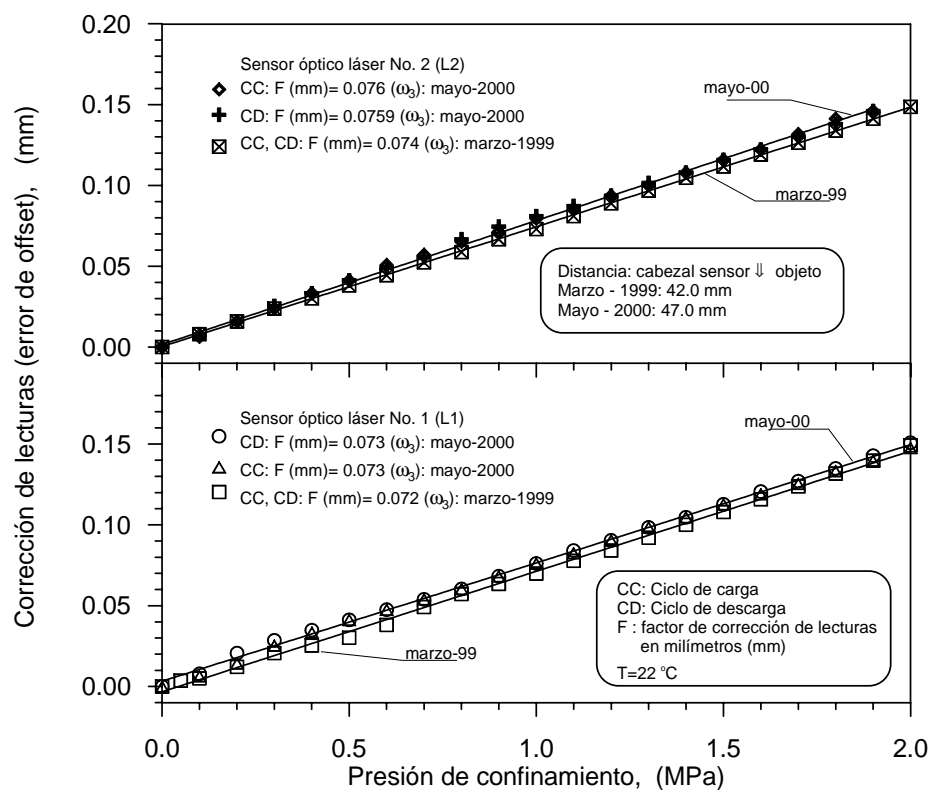


Figura 3.31 Sensibilidad de los sensores láser, bajo diferentes presiones de confinamiento.

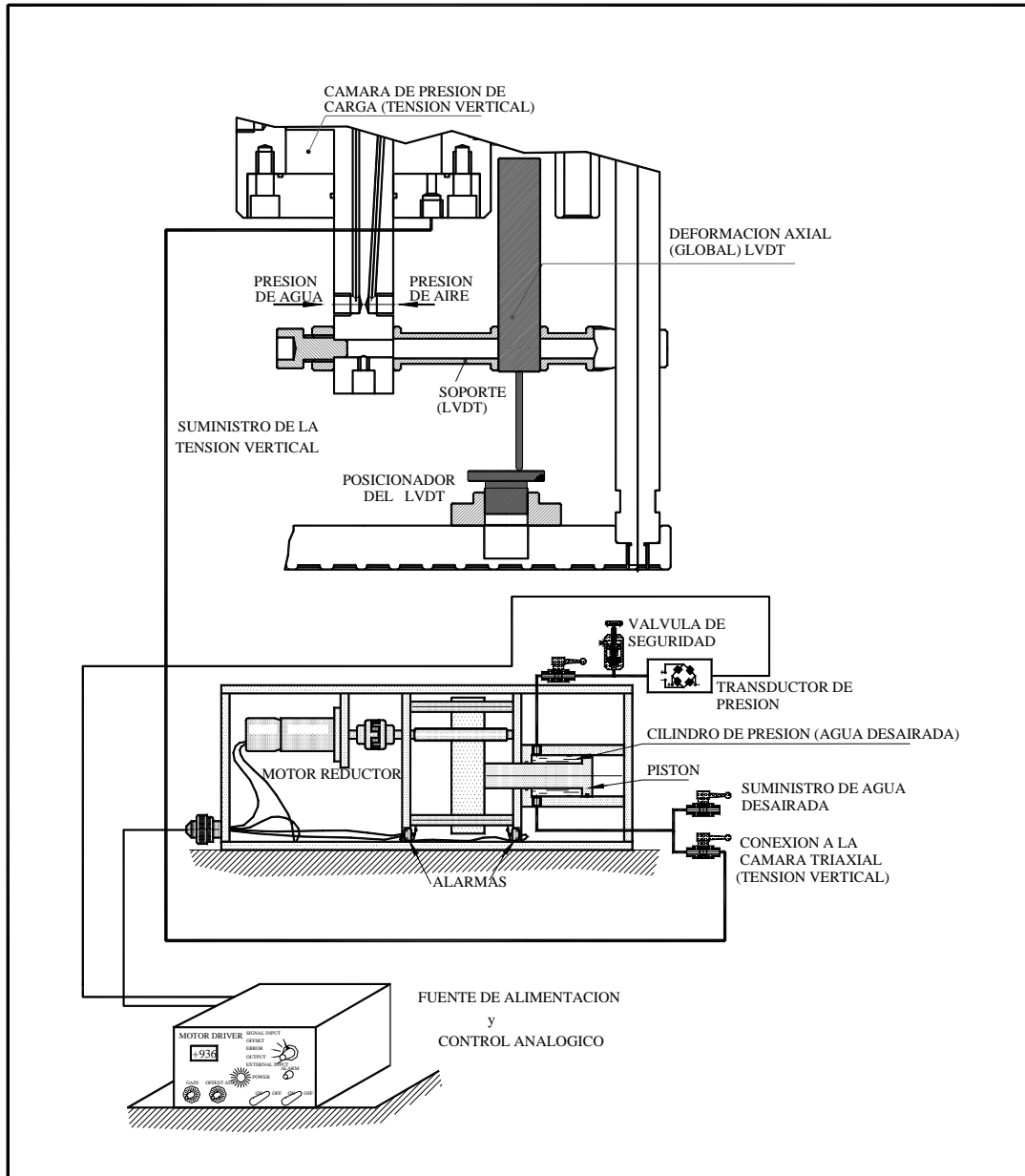


Figura 3.32 Esquema del sistema de imposición de la tensión axial sobre la muestra, por medio de un pistón roscable controlado por un motor reductor de corriente continua, controlando el desplazamiento del pistón de carga.

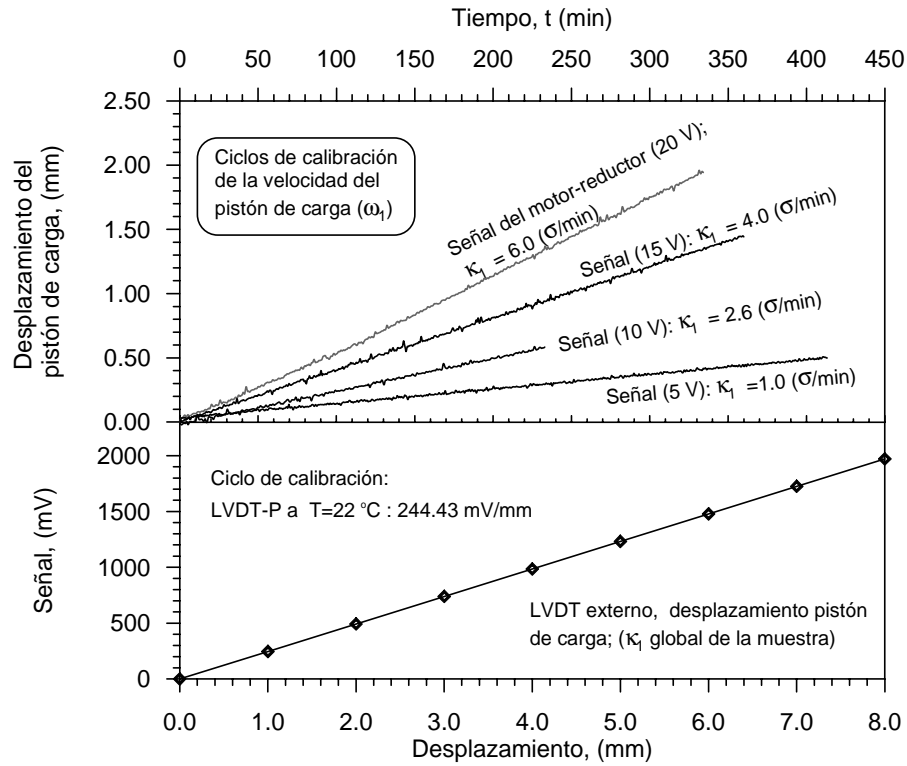


Figura 3.33 Relación entre velocidad del motor reductor, y el desplazamiento del pistón de carga.

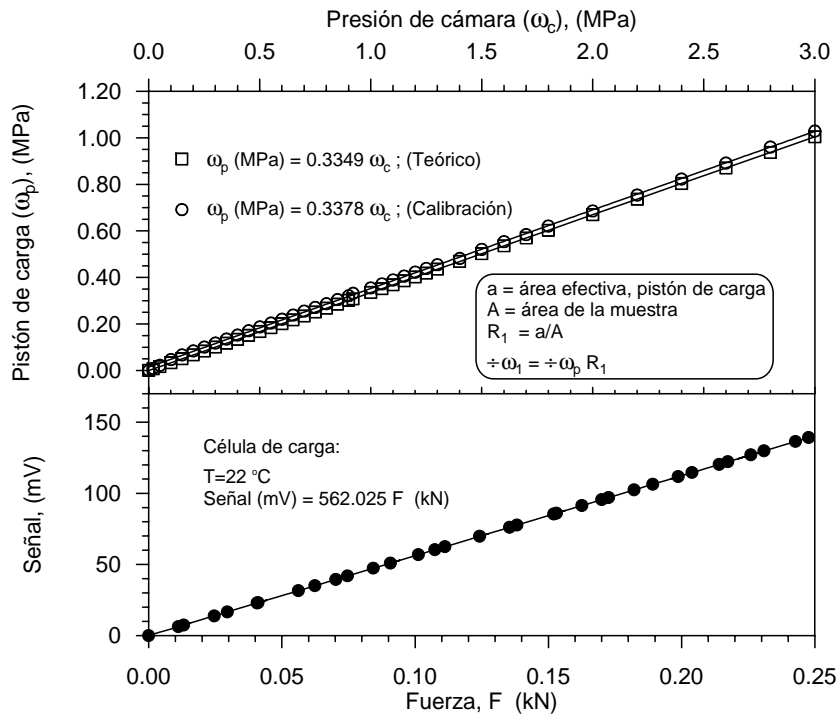


Figura 3.34 Expresión teórica y experimental entre ω_1 y ω_p . Factor de sensibilidad de la señal en (mV) de la célula de carga a fuerza (kN).

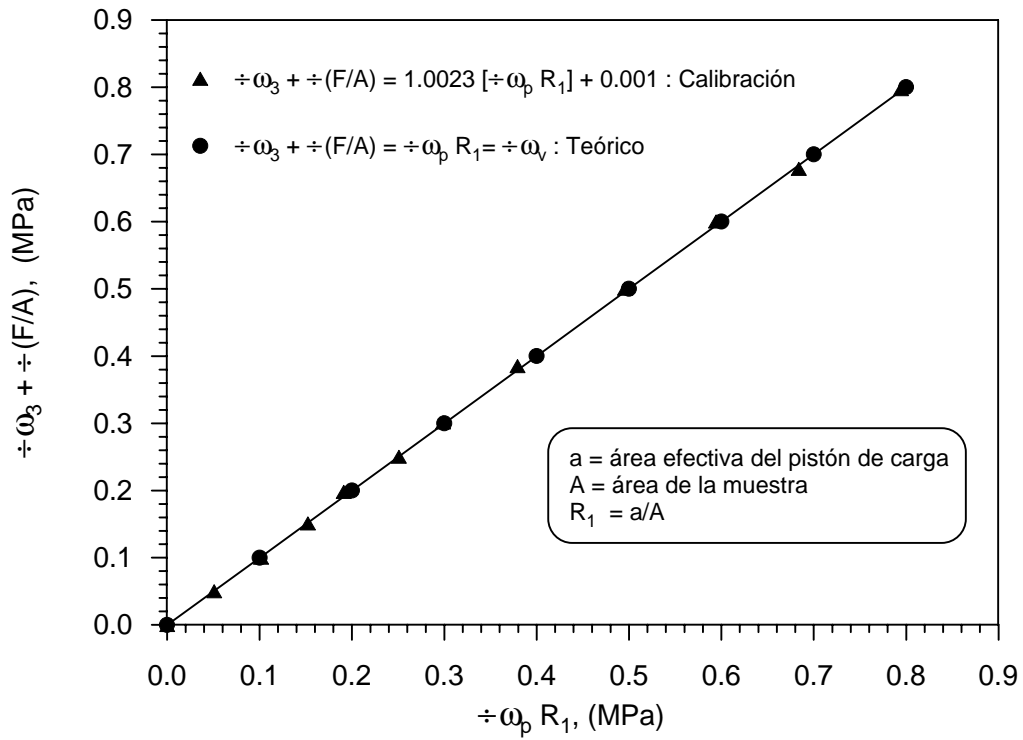


Figura 3.35 Comparación entre datos teóricos y experimentales.



Figura 3.36 Fotografía de la célula de carga (SENSOTEC; capacidad 8.9 kN).

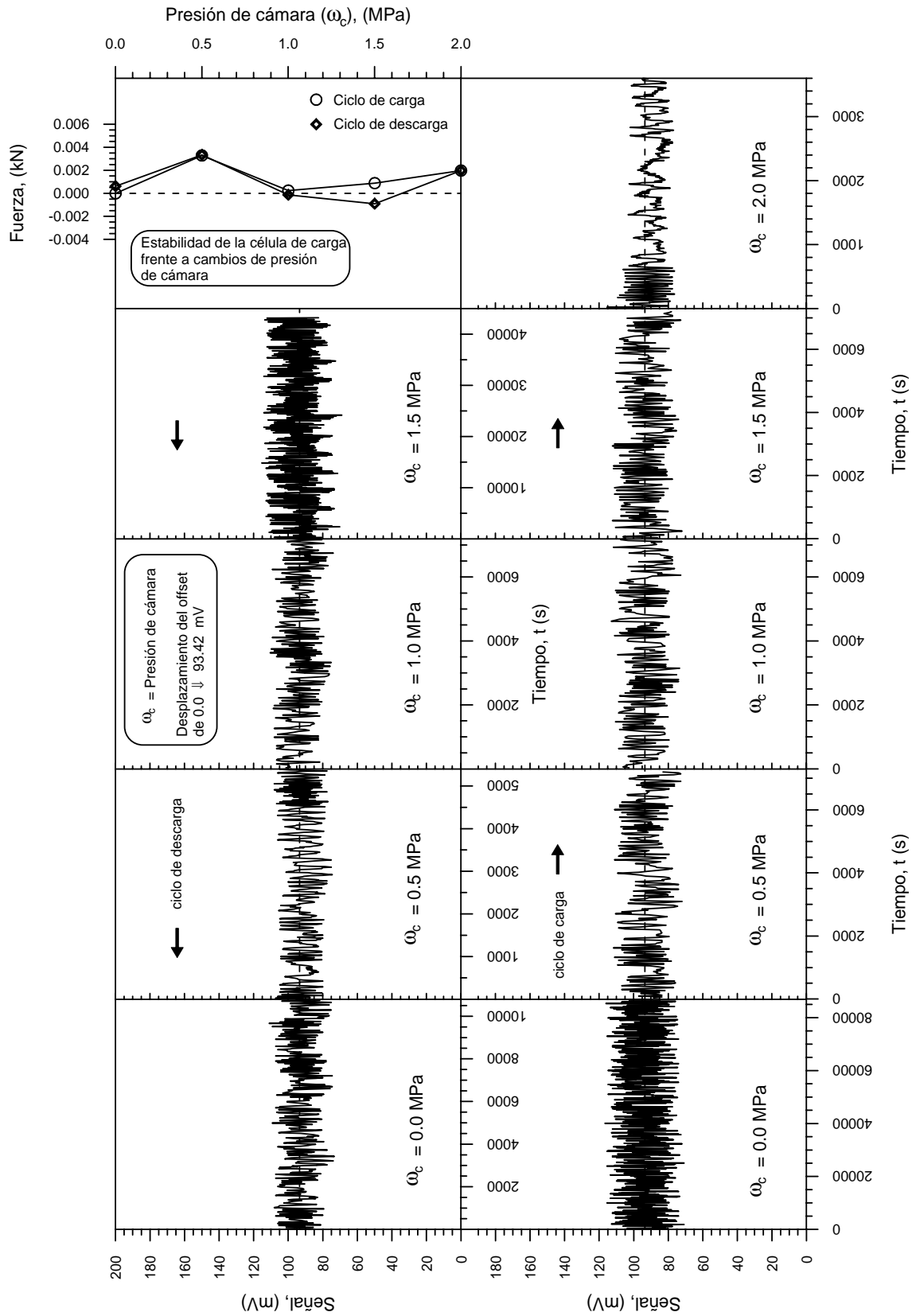


Figura 3.37 Estabilidad de la célula de carga (mV), bajo cambios de presión de cámara.

CAPÍTULO 4. SUELO USADO DURANTE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Origen geológico y composición del suelo

4.1.1 Origen del suelo

El suelo empleado en los ensayos se recogió durante las excavaciones de la construcción de lo que es hoy en día la Biblioteca “Rector Gabriel Ferraté”, del Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) Barcelona.

En un orden de mayor a menor antigüedad, las principales formaciones geológicas que se presentan en el territorio barcelonés son el Paleozoico, el Terciario y el Cuaternario. El Paleozoico está constituido por granitos, que se encuentran al pie de la sierra de Collserola, los cuales aparecen generalmente alterados por efectos del clima mediterráneo formando suelos arenosos blanquecinos. También incluye pizarras, esquistos, cuarcitas y calizas. Después de un importante lapso en la escala cronológica, se depositaron materiales pertenecientes al periodo Terciario, que a la vez se subdividen en las series Mioceno y Plioceno. El Mioceno está formado por diferentes niveles de areniscas, calizas, y margas, generalmente de color rosado y amarillento. Los materiales del Plioceno son margas fosilíferas azules con niveles intercalados de arenas. Los materiales que presentan un afloramiento superficial más extenso en el llano de Barcelona son del Cuaternario, formando una superficie suavemente inclinada desde las sierras hasta el mar. En las partes más bajas se depositaron los materiales más recientes de origen aluvial y deltaico de los ríos Besòs y Llobregat. Los niveles cuaternarios más antiguos corresponden a conos de deyección, originados bajo un régimen pluviométrico de tipo torrencial en un clima cálido y húmedo; están constituidos por arcilla roja en la base, limos de color amarillo o marrón, y una costra calcárea que puede llegar a tener espesores de hasta 1 m. En la Fig. 4.1 se muestra un esquema geológico de la ciudad de Barcelona, en la cual se esquematizan las unidades principales (Vázquez, E, 1998).

4.1.2 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es uno de los métodos más usados en la identificación de minerales en suelos de grano fino y del estudio de su estructura cristalina. A causa de la longitud de onda, alrededor de 1 Å, del mismo orden que el espaciamiento de un plano atómico en materiales cristalinos, los rayos X son eficaces en el estudio de estructuras cristalinas.

Para obtener las características cualitativas de la composición mineralógica del material usado en esta investigación se empleó este método. Una muestra representativa es secada al aire; este suelo se tamiza a través de un tamiz No 200 – 75 μm , y la fracción que pasa se pulveriza para su posterior ensayo. El equipo fue un difractómetro Siemens D-500, con un ánodo CuK (la longitud de onda del rayo incidente es de $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), con una magnitud de paso de 0.05° , velocidad de barrido de $3^\circ/\text{min}$, y un valor inicial de arranque de $2\theta = 3.976^\circ$ hasta 69.976° . Las partículas de polvo aleatoriamente orientadas en todas direcciones aseguran que algunas sean orientadas con respecto al haz del rayo X que produce una característica de reflexión continua y un valor de θ (ángulo del rayo difractado) correspondiente al espaciamiento de los planos prominentes. Como no hay minerales que tengan el mismo espaciamiento del plano, el ángulo al cual ocurre la difracción es usado para la identificación de los componentes cristalinos (ley de Bragg: Mitchell, 1993).

La Fig. 4.2 corresponde al ensayo de difracción de rayos X. Los detalles del montaje e instrucciones de operación de la unidad de difracción se describen en Willard, *et al* (1974). La composición mineralógica de la fracción fina ($< 2 \text{ }\mu\text{m}$) está fundamentalmente compuesta por los minerales: cuarzo, albita, calcita, feldespato, muscovita. La fracción de muscovita podría igualarse con la illita, pero sería necesario un análisis químico para confirmar su presencia.

4.1.3 Microscopia electrónica de barrido ambiental (ESEM)

Debido a la relativa profundidad de campo y al amplio rango de aumentos del microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM), las características de textura pueden determinarse de forma rápida y sencilla al no ser necesario ningún tratamiento previo de secado en las muestras. Las características como tamaño medio de las partículas, distribución, morfología, homogeneidad de su textura, cantidad aproximada y distribución de la porosidad, pueden evaluarse cualitativamente en un tiempo corto.

El programa de ensayos ESEM en esta investigación ha sido llevado a cabo en un equipo Electroscan 2020 (Fig. 4.3), que permite tomar imágenes con electrones secundarios a presiones de hasta 50 torr con portamuestras de enfriamiento termoeléctrico (Peltier). Este equipo facilita trabajar a temperaturas de $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ en relación a la temperatura ambiente, y observar muestras húmedas.

El programa de ensayos consistió en analizar tres estructuras diferentes de una arcilla de baja plasticidad, las cuales se obtuvieron bajo un proceso de compactación isótropa y de ensayos de colapso (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Condiciones iniciales de las muestras observadas en ESEM.

Muestra	ψ_0 g/cm ³	w %	n %	Trayectoria de esfuerzos
A	1.65	11	38	Compactada en condiciones isótropas
B	1.53	8	42	Colapsada bajo inundación a carga constante
C	1.53	8	42	Colapsada bajo un proceso de disminución de la succión matricial hasta la saturación de la muestra

En las figuras 4.4a y b se incluye la estructura de la muestra A, obtenida de un proceso de compactación estática en condiciones isótropas (ver método de compactación, sección 4.3). En la Fig. 4.4c se presenta la estructura de la muestra B obtenida al final de un ensayo de colapso bajo inundación a carga constante (punto de esfuerzo 2 Fig. 4.22b; trayectoria de esfuerzo Fig. 4.34, muestra B2). Finalmente la muestra C (Fig. 4.4d), que presenta condiciones iniciales similares a la muestra B, se obtuvo tras un ensayo de colapso (trayectoria de esfuerzo Fig.4.34, muestra A2).

Las muestras B y C, que se alcanzan por deformación de colapso utilizando dos vías diferentes de hidratación presentan una estructura similar, observándose partículas de limo cubiertas por agregados de arcilla. En el caso de la muestra compactada en condiciones isótropas ($\psi_t=1.65 \text{ g/cm}^3$, $n = 38 \text{ } \%$), la partícula de limo central representa un área de alrededor $37 \text{ }\mu\text{m} \times 80 \text{ }\mu\text{m}$ Fig. 4.4a,b). Por otro lado, el agregado de partículas arcillosas que se muestra en la Fig. 4.4b marca unas dimensiones típicas menores de $15 \text{ }\mu\text{m}$.

4.1.4 Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP)

El tamaño de poros obtenido por la Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP) proporciona el tamaño de poros y su distribución, que son elementos esenciales de la estructura del suelo. La distribución de poros se relaciona con patrones de comportamientos del suelo, tales como: las propiedades de conductividad hidráulica, los fenómenos de retención de agua, y las deformaciones volumétricas.

La MIP está basada en las leyes capilares que gobiernan la intrusión de un líquido que no moja en pequeños poros. Esta ley, en el caso de un líquido como el mercurio, se expresa por la ecuación de Washburn (Griffths & Joshi, 1989):

$$D = 4 \sqrt{\frac{2\gamma \cos \pi}{P}} \quad (4.1)$$

Donde D es el diámetro de poro; P es la presión absoluta aplicada; γ el esfuerzo superficial del mercurio; π ángulo de contacto entre el mercurio y la muestra. El esfuerzo superficial en el estudio fue de $\gamma = 0.485 \text{ N/m}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. El ángulo utilizado fue $\pi = 140^\circ$ (usualmente asumido entre 139° y 147° para minerales de arcilla; Diamond, 1970). Delage y Lefebvre (1984) escogieron un valor $\pi = 141^\circ$ para una arcilla natural, mientras que Griffths y Joshi (1989) recurrieron a $\pi = 147^\circ$ para arcilla ilita y caolinita. Romero (1999) empleó un valor de ángulo de contacto de $\pi = 140^\circ$ (arcilla caolinita–ilita).

El volumen de mercurio V que penetra en los poros se mide directamente como una función de la presión aplicada P . Esta información ($P - V$) sirve como única caracterización de la estructura del poro. La ecuación de Washburn asume que todos los poros son cilíndricos; aunque estos raramente son cilíndricos, la ecuación proporciona una representación práctica de la distribución de los poros. Si la presión decrece, los datos de extrusión son también calculados usando la ecuación de Washburn. Las curvas de extrusión ($P - V$) difieren de las curvas de intrusión debido al mercurio atrapado en los poros con constricción, así como por las diferencias entre los ángulos de contacto (π) de entrada y salida de mercurio. Las diferencias entre las curvas de intrusión y extrusión pueden usarse para caracterizar la estructura de los poros. El programa de ensayos se llevó a cabo en un porosímetro “Micromeritics” (Fig. 4.5); las principales características y especificaciones se presentan en la Tabla 4.2.

El equipo MIP requiere muestras con un volumen máximo de poros de 392 mm^3 , y un volumen total de $5\,000 \text{ mm}^3$ (limitado por el volumen del bulbo del penetrómetro). Las muestras fueron previamente compactadas en condiciones isotropas a una densidad seca de 1.63 g/cm^3 a un contenido de agua constante. Sólo se analizaron muestras normalmente consolidadas.

El estado de la muestra A fue impuesto por un proceso de compactación isotropa bajo una presión de 0.6 MPa , dando como resultado una densidad seca de $\rho_{d0} = 1.63 \text{ g/cm}^3$ a una humedad inicial de $w_0 = 11\%$ (ver método de compactación, sección 4.3). En la muestra B, el análisis MIP se hizo después de aplicar a la muestra una máxima carga isotropa de 1.2 MPa , obteniendo unas condiciones de densidad y humedad de $\rho_d = 1.80 \text{ g/cm}^3$, $w = 10\%$ (en la Fig. 5.13 se observa la trayectoria de esfuerzos). Para la muestra C, el análisis de MIP, fue en una muestra sujeta a una hidratación bajo carga constante

($\omega_n - u_a = 0.6$ MPa) obteniendo una deformación de colapso predominante, y unas condiciones de densidad y de humedad de $\psi_t = 1.73$ g/cm³ y $w = 13.8$ % (ver trayectoria de esfuerzos en la Fig. 5.17).

Tabla 4.2 Porosímetro por intrusión de mercurio “Micromeritics”.

Características	Especificaciones
<i>Baja presión</i>	
Medida	0 a 345 kPa
Resolución	69 Pa
Diámetro de poro	360 a 3.6 σ m
<i>Presión alta</i>	
Medida	Presión atm hasta 228 MPa
Diámetro de poro	6 a 0.005 σ m
Exactitud del transductor	$\pm 0.1\%$
<i>Intrusión</i>	
Resolución	Mayor de 0.1 σ L
Exactitud	± 1 % del máx vol del penetrómetro

De cada muestra se obtuvo cuidadosamente una muestra cúbica cuyas dimensiones son de alrededor 10 mm por lado. Posteriormente, tuvieron un secado al aire (humedad relativa de $h_r = 40$ %). Con este método de secado, la distribución de los macroporos se vería afectada ante pequeñas retracciones en la estructura del suelo.

En la Fig. 4.6 se observa la relación de vacíos de intrusión y extrusión normalizadas por la densidad de las partículas sólidas ($\psi_s = 2.71$ g/cm³). Puede constatarse que el volumen de poros no intruido corresponde a un valor del índice de poros de 0.22, y de 0.16 para las densidades secas de 1.63 y 1.80 g/cm³, respectivamente. Este volumen puede corresponder tanto a poros en que la presión no ha sido suficientemente alta para conseguir la intrusión como a poros de tamaño mayor que el correspondiente a la presión de mercurio más baja utilizada.

Dos tipos de porosidad pueden determinarse con un ciclo de intrusión y extrusión (Fig. 4.7). La intrusión llena todos los espacios de poros accesibles e interconectados, dando la distribución de la porosidad total; mientras que la liberación completa de la presión de intrusión permitirá expulsar sólo una parte del mercurio de los poros, definiendo así la porosidad libre (Delage y Lefebvre, 1984). La diferencia entre el ciclo de intrusión y extrusión es la porosidad atrapada. La porosidad atrapada proviene de las constricciones formadas por puentes de arcilla y agregados de forma irregular, que actúan como “cuellos de botella” al atrapar el mercurio en los inter-agregados de los poros (Romero, *et al*, 1999a). Delage y Lefebvre (1984) proponen que la porosidad libre corresponde al espacio de poros intra-agregados, mientras el espacio de poros inter-agregados corresponda a la porosidad atrapada o constreñida.

La porosidad intra-agregado detectada cuando la presión se libera representa el 7.4 % de la porosidad total en la muestra A; el 18.4 % para la muestra B, y el 19.5 % para la C. Este porcentaje corresponde a un tamaño de poro de aproximadamente 50 nm en la curva de intrusión (Fig. 4.7). El tamaño de poro puede ser aceptado para delimitar la región que separa las zonas de intra e inter agregados (Romero, *et al*, 1999a). Meyer, *et al* (1994) presentan una clasificación con respecto al diámetro de poros D, donde clasifica como macroporos aquéllos que presenten un diámetro mayor de 50 nm. En la Fig. 4.8 se

aprecia la función de relación de vacíos ($-de/d\log D$) y el diámetro de poro D . Este gráfico compara los resultados de diámetros de poros de tal manera que sean seleccionados a intervalos aproximadamente sobre el eje del logaritmo del diámetro, para evitar tamaños de poros enfatizados. El tamaño dominante de la muestra A ocurre alrededor de $15 \sigma_m$. Las muestras B y C presentan un tamaño dominante más reducido, que se evidencia alrededor de $3 \sigma_m$.

Si se asume que el volumen no intruido de poros pequeños corresponde a un índice de poros del orden de 0.16, la porosidad intra-agregado podría suponerse corresponde a un porcentaje aproximado del 30 y del 50 % del volumen total de poros para densidades secas de 1.63 y 1.8 g/cm^3 , respectivamente.

Con los datos de intrusión de mercurio se puede estimar la superficie específica (S_s) del suelo en estudio (Fig. 4.9). En la Tabla 4.3 se incluyen los resultados del volumen de intrusión de mercurio, y la S_s para cada muestra.

Tabla 4.3 Superficie específica estimada por el método de MIP.

Muestra	V_{\max} de intrusión de Hg (cm^3/g)	Relación de vacíos intruida (e)	S_s (m^2/g)	ψ_d (g/cm^3)
A	0.170	0.47	4.00	1.63
B	0.099	0.27	5.83	1.80
C	0.104	0.29	6.65	1.73

El cálculo de la S_s asume una forma de poros cilíndrica aplicando la ecuación (4.1), el cual relaciona el diámetro de poros aparentes D con la presión total aplicada P . El incremento de volumen introducido normalizado dV , puede relacionarse con el incremento de la superficie específica mediante la siguiente expresión (Romero, 1999):

$$dS_s \mid \frac{4dV}{D} \mid 4 \frac{PdV}{v \cos \pi} ; S_s \mid 4 \frac{1}{v \cos \pi} \int_0^{V_{\max}} P dV \quad (4.2)$$

Donde D es el diámetro de poro; P la presión aplicada; π ángulo de contacto entre el mercurio y la muestra; v el esfuerzo superficial del mercurio, y V_{\max} el volumen máximo de intrusión de mercurio.

4.2 Ensayos de clasificación geotécnica

4.2.1 Granulometría

Para obtener la curva granulométrica se emplearon dos métodos: el de tamizado, que permite clasificar desde tamaños de gravas hasta partículas de dimensiones de 0.075 mm , y el de sedimentación que propicia continuar la gráfica desde 0.075 mm hasta los tamaños más pequeños de arcillas. Con los resultados de ambos métodos (Tabla 4.4) se construye la curva granulométrica del suelo a estudiar (Fig. 4.10).

Se han definido otras características geotécnicas, como el coeficiente de uniformidad (C_u) y el de curvatura (C_c). Considerando el valor del diámetro mínimo indicado en la curva granulométrica se

obtiene un valor de C_u mayor de 4, y un C_c aproximadamente de 1, por lo que el suelo se considera bien graduado. Otra característica geotécnica que se determinó fue la densidad de las partículas (ψ_s) mediante el procedimiento del picnómetro (Norma ASTM D-854-83), dando como resultado un valor de 2.71 g/cm^3 . En la Tabla 4.5 se resumen las características del suelo empleado en esta investigación. En la Fig. 4.10 se muestran los resultados de Gens, *et al* (1995) para un suelo de la misma zona.

Tabla 4.4 Fracción granulométrica de las partículas del suelo en estudio.

Nº de tamiz (ASTM)	Abertura (mm)	Material que pasa (%)
16	1.18	100.0
40	0.425	83.31
100	0.150	67.99
200	0.075	60.59
Sedimentación	0.04	50.62
	0.02	38.33
	0.005	22.87
	0.002	16.13

Tabla 4.5 Características de las partículas del suelo usado.

Definición	Datos de laboratorio
Tipo de partícula:	
Arena	39.4 %
Limo	44.5 %
Arcilla*	16.1 %
Características:	
C_u, C_c	bien graduado
ψ_s	2.71 g/cm^3

*La fracción arcillosa es predominantemente de minerales de ilita.

4.2.2 Límites de consistencia

Se determinaron los límites líquido (w_L) y plástico (w_P), para un suelo secado al aire que pasa por el tamiz No 40, siguiendo los procedimientos de la Norma ASTM-D4318. Los valores medios para este suelo en estudio se indican en la Tabla 4.6. La humedad higroscópica que presenta el suelo es de $w_h = 2.2 \%$, a una humedad relativa del laboratorio del orden de $h_r = 47 \%$. En la Fig. 4.11 se muestra la carta de plasticidad, la cual incluye resultados consistentes reportados por Gens, *et al* (1995). El suelo en estudio, puede clasificarse de acuerdo con la carta de plasticidad, como una arcilla de baja plasticidad (CL), Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS, ASTM-D2487.

El comportamiento del suelo resulta principalmente influido por las fracciones de arcilla y de limo. Para llegar a esta conclusión se tomaron como base los resultados de los análisis de microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM), porosimetría por intrusión de mercurio (MIP), granulométricos y mecánicos. Por otro lado, el valor del contenido de agua higroscópico ($w_h = 2.2 \%$) indica la presencia de la fracción arcillosa (Fig. 4.7). Así mismo, los resultados de los ensayos

mecánico, revelan deformaciones de colapso mayores a las de hinchamiento, al incrementar el grado de saturación. Este comportamiento indica la presencia de partículas de limo predominantemente vinculadas por puentes de arcilla.

Tabla 4.6 Límites de consistencia.

Determinación de:	Dato del laboratorio
ω_h	2.2 %
ω_L	32.0 %
ω_P	16.0 %
IP	16.0 %

4.2.3 Obtención de curvas humedad – densidad, bajo diferentes valores de energía específica de compactación

El procedimiento de compactación, por sus características se define como un método mecánico basado en la expulsión del aire que ocupan los poros del suelo, y en la reducción rápida del índice de vacíos (e) a humedad constante. El objetivo básico de la compactación de un suelo, es la obtención de un nuevo material con un comportamiento adecuado para su aplicación específica. La compactación genera en el suelo deformaciones permanentes que modifican sus propiedades originales, causando entre otros efectos la densificación del suelo, aumento de la resistencia mecánica, incremento de la rigidez, disminución de la permeabilidad, y reducción de la erosionabilidad. Estos son algunos de los efectos más importantes, pero también altera la estructura del suelo y modifica la anisotropía de sus propiedades mecánicas (Morel, 1980).

Según Reséndiz (1980), el estudio de los suelos compactados puede enfocarse definiendo tres grupos de variables, que permiten abarcar el problema de manera bastante completa. Aunque podrían elegirse otras variables, es necesario que sean independientes unas de las otras y que el conjunto defina por completo el estado interno del suelo; es decir, que sean auténticas variables de estado.

Grupo 1: variables fundamentales que controlan el comportamiento de un suelo compactado

- // - Humedad de compactación
 - Nivel de la energía de compactación
 - Método de compactación
 - Tipo de suelo

Grupo 2: variables más importantes que gobiernan el comportamiento de las obras construidas con suelos compactados

- // - Cambio de volumen (colapso e expansión)
 - Resistencia
 - Deformabilidad
 - Permeabilidad
 - Erosionabilidad

Grupo 3: conjunto de variables intermedias que actúan como nexo entre los dos grupos anteriores relacionándolos

- // - Densidad seca (índice de vacíos)
 - Grado de saturación
 - Estructura del suelo

Con el objetivo de obtener la densidad seca máxima (ψ_{dmax}) y su humedad correspondiente, denominada óptima (w_{op}), se realizaron ensayos de compactación Próctor normal y Próctor modificado, conforme a la Norma ASTM D-698 y D-1557 respectivamente, así como ensayos de compactación por impactos con un martillo especial a escala. En la Tabla 4.8 se incluyen los ensayos y en la Fig. 4.12 se muestra los parámetros obtenidos en el plano Próctor.

Tabla 4.8 Parámetros de las curvas de compactación.

Compactación	w_{op} (%)	ψ_{dmax} (g/cm ³)	Sr (%)	Especificaciones
<u>Impactos:</u>				
Proctor normal	13.0	1.89	81	ASTM D-698, $E_c= 600$ (kN m/m ³)
Proctor modificada	9.7	2.04	80	ASTM D-1557, $E_c=2700$ (kN m/m ³)
Martillo a escala*	16.5	1.75	81	$E_c= 600$ (kN m/m ³), N= 12, n= 1
Martillo a escala*	10.0	2.02	80	$E_c= 6000$ (kN m/m ³), N= 27, n= 1
<u>Estático:</u>				
Presión constante	17.0	1.75	84	# $\omega_v= 0.6$ MPa

E_c : energía específica; N: número de golpes; n: número de capas

*molde de compactación: $\lambda= 50$ mm; $h=20$ mm, martillo a escala, altura de caída 20 cm; peso 1.0 kg

En la Fig. 4.12 se observa que las curvas de compactación con el martillo especial a escala, presentan valores menores de densidad secas máxima (ψ_d) que en las curvas obtenidas con el martillo convencional. Esto es debido a que se desarrolla mayor fricción por unidad de volumen en el suelo durante la compactación, comparados con los moldes convencionales (Lawton, *et al*, 1989). No obstante, la relación densidad–humedad desarrollada con el martillo especial a escala, presentan la misma forma y prácticamente la misma línea de grado de saturación (Sr) en las condiciones óptimas, que la obtenida con el martillo convencional.

4.3 Ensayos de compactación isótropa y técnicas de preparación de las diferentes estructuras de suelo usados en los ensayos

4.3.1 Ensayos de compactación estática bajo esfuerzo isótropo controlado

4.3.1.1 Procedimiento de ensayo y resultados

Los ensayos de compactación estática, bajo presión isótropa controlada se llevaron a cabo con objeto de controlar la presión de preconsolidación en la estructura del suelo, al variar la densidad seca y el contenido de agua. Con esto se conoce su historia de esfuerzo y succión que conduce a unas condiciones iniciales.

El suelo se compactó estáticamente en dos etapas. En la primera se utilizó un molde cilíndrico y una carga vertical muy pequeña (0.05 MPa) para conseguir una densidad seca de $\psi_d= 1.2$ g/cm³, suficiente para manipular las probetas. En una segunda, las muestras se sometieron en una cámara triaxial convencional, a diferentes valores de presión isótropa de confinamiento, obteniendo así las curvas de compactación en el plano Próctor (Fig. 4.13-4.15).

Las diversas etapas del procedimiento adoptado se pueden sintetizar de la siguiente manera:

≠ *Preparación del material*

- a) El suelo que pasa por el tamiz No 16-1.18 σm (ASTM) se seca al aire, bajo las condiciones de laboratorio. Se alcanza una humedad higroscópica del material alrededor 2.2 % a una humedad relativa promedio de laboratorio de $h_r = 47\%$
- b) Determinada la humedad higroscópica, se procedió al cálculo de la cantidad de suelo y agua necesarios para obtener el peso unitario seco (v_d), y el contenido de agua (w) deseado, una vez conocido el peso del suelo seco (w_{SS}) que ocupará el volumen (V) del molde ($w_{SS} = v_d V$). La cantidad de suelo w_{SS} (incluyendo la humedad higroscópica w_h) que se necesita pesar para la preparación de la probeta, se obtiene por la expresión:

$$w_{SS} = w_{SS} \left(1 + \frac{w_h}{100} \right) \quad (4.3)$$

A su vez, la cantidad de agua a añadir al suelo (descontando la humedad higroscópica) está dada por la ecuación:

$$w_w = w_{SS} \left(\frac{w}{w_{SS}} - \frac{w_h}{100} \right) \quad (4.4)$$

- c) Con la incorporación del agua con un atomizador, se procede a la homogeneización del agua con el suelo, seguida de una amasadura del mismo con una espátula en un recipiente de vidrio
- d) Como durante la homogeneización ocurre una evaporación del agua, la cantidad evaporada se corregía añadiendo un valor que corresponda a la pérdida por evaporación. En todas las mezclas se utilizó agua destilada
- e) Se optó por 24 horas de curado en bolsas de plástico, para garantizar una condición homogénea en las muestras

≠ *Primera etapa de la compactación estática*

- a) Se coloca el suelo en un molde cilíndrico conformado por tres piezas ajustables (Figs. 4.13a y 4.17a), formando probetas de $\lambda = 35$ mm diámetro, y $h = 70$ mm altura
- b) Se aplica un esfuerzo vertical ($\sigma_v - u_a$) muy pequeño de 0.05 MPa para conseguir una densidad de $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$, suficiente para manipular la probeta y continuar con la etapa 2. En las figuras 4.13a y 4.14a, se muestra una fotografía de la probeta obtenida en esta primera etapa

≠ *Segunda etapa de la compactación estática*

- a) La probeta obtenida en la primera etapa se monta en una cámara triaxial convencional (Fig. 4.13b y 4.14b), bajo diferentes tensiones isotropas netas constantes ($\sigma_n - u_a$). En la Fig. 4.15 se muestran en el plano Próctor las curvas de compactación correspondientes a las presiones de confinamiento de 0.3, 0.6 y 1.2 MPa.
- b) La densidad seca tras la compactación se obtiene mediante un anillo de acero inoxidable de 25 mm diámetro y 22 mm altura, previamente engrasado para minimizar los efectos de fricción. La densidad se consigue en la zona central de la probeta, ya que en sus extremos se presentan efectos de fricción entre la muestra y los sistemas de drenaje (cabezal y pedestal) (Fig. 4.13c y 4.14c).

c) La succión total (Φ) de la muestra, después de la compactación se obtuvo con un psicrómetro de transistor (Fig. 4.13c). En la Fig. 4.15 las líneas continuas indican los valores de succión total (Φ) tras compactar las muestras con diferentes combinaciones de presión de confinamiento y humedad. En la sección 3.3 se describen las características y calibración del psicrómetro transistor usado (Fig. 3.1-3.3).

El tiempo de aplicación de la presión de carga en este proceso de compactación es un factor importante a controlar. Para las muestras del lado seco se optó por un tiempo de 40 min. En el caso de las muestras compactadas del lado húmedo se observó cómo se incrementa la densidad conforme se incrementa el tiempo de aplicación de la presión de carga (Fig. 4.16). En lado húmedo se optó por un tiempo de equilibrado de 90 min. Un aspecto notable son los bajos grados de saturación después de la compactación a bajos valores de succión muy próximos a la condición óptima. Este hecho se asocia con la dificultad de expulsar el aire, a pesar del doble drenaje en ambos extremos de la muestra durante la carga (Fig. 4.13b y 4.14b). En las muestras compactadas del lado húmedo se generan presiones en los poros del suelo durante el proceso de compactación pudiendo disipar una parte. A medida que la humedad de compactación es mayor, el incremento de presión en el aire y agua en los poros es mayor y la salida del aire del interior de la muestra se hace más difícil lo que conduce a muestras con densidades menores. Si la carga isótropa en el triaxial se mantiene durante 24 horas, se disipa totalmente el exceso de presión en los poros, y la densidad y humedad final obtenida se acerca a los óptimos de las curvas de compactación (Fig. 4.16).

En la Fig. 4.15 se presentan las curvas de compactación y los contornos de igual succión, como resultado de la interpolación de diferentes datos (alrededor de 500 resultados) obtenidos al variar contenidos de agua y densidad seca, siguiendo el procedimiento de compactación descrito. La succión total se midió después de la compactación, con un psicrómetro de transistor (Woodburn, *et al.*, 1993). Por otro lado, se realizaron repetidas medidas en el rango de baja succión (valores menores de 200 kPa), donde el psicrómetro no presenta una buena repetibilidad. No hay importantes cambios en contenidos de agua, a valores de succión mayores de 2 MPa.

Tabla 4.9 Parámetros obtenidos de las curvas de compactación estática en condiciones isótropas: esfuerzo controlado.

$\omega_m - u_a$ MPa	w_{op} (%)	ψ_{dmax} (g/cm ³)	S_r (%)	Succión total (Φ) MPa
0.3	15.5	1.67	68	- 0.2
0.6	13.8	1.74	67	- 0.2
1.2	12.7	1.82	70	- 0.1

$\omega_m - u_a$: presión estática isótropa de compactación.

El procedimiento de compactación estática en condiciones isótropas, descrito en los párrafos anteriores, nos permite la definición clara de las tensiones aplicadas durante el proceso de compactación. En el caso de suelos compactados del lado seco, la compactación puede considerarse como realizada en condiciones drenadas, y conocer exactamente el valor de las presiones aplicadas sobre el esqueleto del suelo durante la compactación. En el caso de suelos compactados del lado húmedo del óptimo, dado el tamaño de las muestras y el tiempo de aplicación de la carga, la compactación puede considerarse como parcialmente drenada y la definición de las cargas aplicadas de forma efectiva sobre el esqueleto del suelo es más compleja.

4.3.2 Técnica de preparación de las muestras usadas en los diferentes ensayos

En este apartado se relata el proceso de preparación de las muestras. Todas las probetas fueron fabricadas conforme al procedimiento de compactación estática en condiciones isotropas (esfuerzo controlado), siguiendo el método de compactación descrito (Fig. 4.15).

Para el programa de ensayos en la *célula triaxial automática GDS* (sección 3.4), y la *célula triaxial con control de succión* (sección 3.7), la geometría inicial de las probetas a compactar fue de 50 mm diámetro y 100 mm altura. En la Fig. 4.17b, se muestra el molde cilíndrico utilizado ($\lambda=50$ mm y $h=100$ mm). Las probetas a ensayar se obtuvieron mediante tallado de la zona central de la probeta compactada, cuyas dimensiones finales fueron de 38 mm diámetro, y 76 mm altura, y en la Fig. 4.18 se muestra un esquema del procedimiento seguido.

En los ensayos realizados en la *nueva célula edométrica con control de succión* (sección 3.5), el molde cilíndrico utilizado fue de 70 mm diámetro y 40 mm altura (Fig. 4.17c). Para estos ensayos se utilizaron pastillas de suelo de 50 mm diámetro y 20 mm altura, labradas con un anillo cortador ($\lambda=50$ mm, $h=20$ mm) (Fig. A.3, Anexo A) de la zona central de la probeta cilíndrica (70 mm diámetro y 40 mm altura) (Fig. A.1, Anexo A), obtenida tras la compactación isotropa, siguiendo el mismo esquema de obtención de probetas de la Fig. 4.18. En el Anexo A se presentan los pasos previos, montaje y el desarrollo del ensayo.

En el caso de los ensayos en los equipos *edométricos convencionales*, y en la *mini-célula isotropa rígida* (sección 3.6), se empleó el mismo molde cilíndrico utilizado en la obtención de las curvas de compactación estática en condiciones isotropas ($\lambda=35$ mm y $h=76$ mm) (Fig. 4.17a). Para los ensayos en los edómetros convencionales se obtuvieron mediante tallado probetas de 30 mm diámetro por 15 mm altura y para los ensayos realizados en la mini-célula isotropa rígida, se obtuvieron probetas por tallado de 20 mm diámetro y 20 mm altura. En el Anexo B se describe a detalle la mini-célula isotropa rígida, así como los pasos previos al montaje y desarrollo del ensayo.

Con la siguiente expresión se determina el grado de saturación inicial de las muestras:

$$Sr_0 = \frac{\frac{v_s}{v_w} w_0}{\frac{v_s}{v_d} 41} \quad (4.5)$$

El índice de vacíos inicial del suelo, e_0 , se determina mediante:

$$e_0 = \frac{w_0 v_s}{Sr_0 v_w} \quad (4.6)$$

Para cada probeta fabricada se obtiene un punto de la curva de compactación en el plano Proctor, caracterizado por la humedad (w_0); densidad seca (ψ_d); o el índice de vacíos (e_0); grado de saturación (Sr_0); y la succión total (Φ_0) que representan las condiciones iniciales de la muestra a ensayar.

4.3.3 Análisis de las curvas succión – grado de saturación y succión – humedad de compactación. Curva de retención

4.3.3.1 Introducción

Las relaciones succión–humedad (o succión–grado de saturación) desempeñan un importante papel en la caracterización del suelo parcialmente saturado. La representación gráfica de esta relación se denomina *curva característica*, *curva de succión* o *curva de retención*. Sus valores corresponden a un suelo determinado, con una densidad también determinada. Su naturaleza está directamente asociada con la composición granulométrica, mineralógica y estructura del suelo. De una forma general la geometría de los poros, la magnitud y la composición mineralógica de la fracción fina son determinantes en la posición relativa, forma y pendiente de la curva característica.

El contenido de agua en el suelo bajo pequeños valores de succión depende primordialmente del efecto capilar y de la distribución de los poros, y por tanto de su estructura. Por otra parte para altos rangos de succión, cuando el agua retenida debe estar prácticamente adsorbida a las partículas, la importancia de la textura y de la superficie específica del material es superior a la de la estructura. Esto explica el hecho de que para una succión determinada, los valores del contenido de humedad en arcillas es superior a la de los limos y arenas (Hillel, 1971).

La curva característica de un suelo no es biunívoca, debido al fenómeno de histéresis. Ello origina que la curva para un suelo durante la fase de secado difiera de la correspondiente a la fase de humedecimiento, existiendo diferentes valores de contenidos de humedad para un determinado valor de succión. Se habla por ello de tramos de humedecimiento y secado.

Van Genuchten (1978, 1980) propuso un modelo para relacionar la succión y el contenido de humedad. Esta expresión que caracteriza el grado de saturación (S_r), o contenido de agua normalizado en función de la succión se expresa de la siguiente manera:

$$S_r = \frac{w}{w_{sat}} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\Phi}{\zeta} \right)^{2m}} \right]^{1/m} \quad (4.7)$$

Donde los parámetros ζ (relacionado con la entrada de aire en el suelo), n (relacionado con la pendiente del punto de inflexión), y m (relacionado con el contenido de agua residual) son constantes empíricas. El parámetro (m) se relaciona con (n) de la siguiente forma: $m = 14/(n-1)$. En la anterior expresión (w) representa el contenido de humedad en el suelo, y w_{sat} el contenido de humedad en saturación.

4.3.3.2 Curva de retención

Con los valores de la succión total (Φ) de las muestras compactadas en condiciones isótropas (sección 4.3.1.1) determinada con la técnica psicrométrica, se dibujan las curvas de succión–humedad de compactación (s, w), y succión–grado de saturación (s, S_r). Las curvas de retención se obtuvieron a índices de poro constante. En la Fig. 4.19 se muestra que para humedades de compactación crecientes,

la succión disminuye. Por otro lado, en la Fig. 4.20 se observa cómo la succión en el suelo disminuye al crecer el grado de saturación del mismo. Los valores altos de succión se controlan principalmente por los poros intra-agregados. Bajo esta condición, un cambio en la densidad del suelo básicamente se refleja en un cambio en los vacíos de los macroporos, la cual tiene una pequeña influencia sobre la succión del suelo (Romero, 1999). La humedad correspondiente a los poros intra-agregados puede estimarse en el orden del 6 %, lo que implica que el volumen de poros intra-agregados es el 44, 35 y 27 % del volumen total de poros para densidades del 1.77, 1.65 y 1.45 g/cm³ respectivamente. Estos valores se determinaron considerando el máximo contenido de agua reportado por las curvas de retención.

En la Fig. 4.21 se muestran los valores experimentales y los teóricos conforme la relación de Van Genuchten (1980), y la ec 4.7. Los parámetros de la curva de Van Genuchten que mejor se adaptan a los datos experimentales se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Parámetros de la curva de retención. Van Genuchten (1980).

E	ρ_d (g/cm ³)	ζ (MPa ⁻¹)	m	n
0.87	1.45	15.25	0.27	1.38
0.75	1.55	15.95	0.25	1.34
0.64	1.65	17.60	0.23	1.30
0.55	1.75	23.80	0.20	1.24
0.53	1.77	27.8	0.19	1.23

4.4 Ensayos previos de comportamiento deformacional

4.4.1 Ensayos de colapso

4.4.1.1 Ensayos de colapso. Edómetro convencional

Los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo en estado no saturado son los relacionados con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser de colapso o de expansión. El fenómeno de colapso ha sido comentado en apartados anteriores (sección 2.2.6.1).

El desarrollo de este programa de ensayos tiene por objeto obtener datos complementarios sobre tiempo-deformación, y carga-deformación de un espécimen compactado en condiciones isotropas. Con ello se pretende evaluar la tendencia al colapso del material artificialmente preparado.

En una primera fase se realizó un programa de ensayos para determinar, bajo diferentes cargas verticales, la deformación de colapso por inundación del suelo en muestras fabricadas a diferentes condiciones de humedad y densidad. El procedimiento de compactación fue el de la sección 4.3.1. Para los ensayos se emplearon probetas de suelo de 30 mm diámetro, y 15 mm altura, extraídas de la zona central de la probeta cilíndrica ($\lambda=35$ mm, $h=70$ mm) obtenida tras la compactación estática en la cámara triaxial convencional (sección 4.3.2).

Los ensayos para lograr la deformación de colapso se ejecutaron en edómetros convencionales (sección 3.5.1) aplicando una carga vertical (ω_v). Una vez estabilizada la deformación por la carga vertical, se saturó la muestra mediante inundación a carga constante. En la Tabla 4.11 y en la Fig. 22a se presentan las condiciones iniciales y las cargas verticales aplicadas en cada uno de los ensayos. En la Fig. 4.23 se muestra una trayectoria de tensiones para el ensayo B1 de colapso. Los resultados de los ensayos de colapso se resumen en la Tabla 4.12.

En los resultados de los ensayos de colapso (Fig. 4.24) se puede ver que los suelos con un contenido de agua de compactación inicial baja presentan la mayor deformación de colapso, y conforme dicho contenido de agua aumenta esta deformación disminuye hasta valores casi nulos para contenidos de agua próximas al óptimo de compactación.

Tabla 4.11 Ensayos de colapso, bajo inundación y condiciones iniciales.

Grupo	w_0 %	ψ_{d0} g/cm ³	$\omega_m - u_a$ MPa	...	ω_v MPa
A1	11.0	1.52	0.3	1.00	0.6
A2	11.0	1.49	0.3	0.95	1.2
A3	14.5	1.64	0.3	0.37	0.6
A4	14.5	1.64	0.3	0.38	1.2
B1	11.0	1.65	0.6	0.8	0.6
B2	11.0	1.63	0.6	0.85	2.4
B3	11.0	1.67	0.6	0.75	1.2
C1	8.0	1.66	1.2	1.90	1.2
C2	8.0	1.66	1.2	1.80	2.4
C3	11.0	1.76	1.2	0.58	2.4
C4	11.0	1.74	1.2	0.70	1.2

Nota: w_0 : humedad inicial; ψ_{d0} : densidad seca inicial; $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica); ω_v : presión vertical durante la inundación.

Por otra parte, se observa una reducción de la deformación de colapso a medida que aumenta la magnitud de la carga vertical aplicada sobre el suelo. Esta tendencia se debe a que al aplicar cargas grandes la reducción del volumen de poros consiguiente se traduce en una estructura más densa, que dificulta el desarrollo de las deformaciones de colapso. Así mismo, durante el proceso de carga a humedad constante, el valor de la succión del suelo puede disminuir y reducir el valor de las deformaciones debido a los cambios de succión. El papel de la densidad seca en el momento del inicio de la saturación (ψ_{d1}) se muestra en la Fig. 4.25, donde se observa que los suelos con una densidad seca baja son los más propensos al colapso, y en la Fig. 4.26 la influencia de la succión inicial en el fenómeno de colapso, donde puede observarse cómo el colapso es más grande para el suelo con mayor succión inicial.

4.4.1.2 Ensayos de colapso. Célula edométrica con control de succión

En una segunda fase de ensayos de colapso, éstos se realizaron en una célula edométrica nueva con control de succión (las principales características de la célula edométrica se describen en la sección 3.5.2, Fig. 3.10). Se analizaron dos tipos de ensayos: **A**) ensayos de colapso controlando la reducción

de la succión matricial ($u_a - u_w$) hasta la saturación total de la muestra, y **B**) ensayos de colapso con intrusión de agua a presión atmosférica; ambos ensayos bajo carga constante.

Tabla 4.12 Resultados de los ensayos de colapso, bajo inundación a carga constante.

Grupo	$\omega_m - u_a$ MPa	ω_v MPa	Ψ_{d1} g/cm ³	e_1	Sr ₁ %	$\kappa_{colapso}$
A1	0.3	0.6	1.73	0.61	47	0.09
A2	0.3	1.2	1.78	0.53	57	0.06
A3	0.3	0.6	1.77	0.52	80	0.00
A4	0.3	1.2	1.96	0.38	100	0.00
B1	0.6	0.6	1.75	0.55	53	0.075
B2	0.6	2.4	1.98	0.36	80	0.02
B3	0.6	1.2	1.87	0.45	66	0.05
C1	1.2	1.2	1.80	0.50	43	0.11
C2	1.2	2.4	1.91	0.42	53	0.075
C3	1.2	2.4	1.99	0.38	78	0.02
C4	1.2	1.2	1.90	0.46	71	0.04

Nota: $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas; ω_v : presión vertical durante la saturación; Ψ_{d1} : densidad seca antes de la saturación y con la presión vertical aplicada; e_1 : índice de poros con una densidad Ψ_{d1} ; Sr₁: grado de saturación antes de la saturación; $\kappa_{colapso}$: deformación unitaria de colapso.

El procedimiento de compactación es el indicado en el apartado 4.3.1. Para los ensayos se utilizaron pastillas de suelo de 50 mm diámetro y 20 mm altura, extraídas de la zona central de una probeta cilíndrica ($\lambda = 70$ mm, $h = 40$ mm), obtenida tras la compactación isotropa. En los ensayos de colapso con control de succión, la carga se aplicó por etapas. Cada etapa de carga se mantuvo hasta alcanzar la deformación vertical un equilibrio (como mínimo dos días) bajo succión matricial constante ($u_a - u_w$). En la Fig. 4.27 se muestra la deformación vertical durante el proceso de carga. En la trayectoria de humedecimiento se aplicó la técnica de traslación de ejes manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$) bajo una presión neta vertical constante ($\omega_v - u_a$). En la Fig. 4.28 se observa la evolución de la deformación de colapso durante el humedecimiento, así como los cambios en contenidos de agua (w%) y grados de saturación (Sr). En la Fig. 4.29 se muestra la evolución temporal de la entrada de agua y la deformación de colapso en cada cambio de succión. En la última etapa, la presión de agua se incrementa por encima de la presión de aire ($u_a - u_w = -0.01$ MPa) para lograr la saturación total de la muestra. Un medidor de cambio de volumen conectado en la base del equipo (No 3, Fig. 3.10), (agua a presión que entra en la muestra) y un segundo medidor de cambio de volumen conectado en la parte superior del edómetro (No 14, Fig. 3.10) (agua que sale de la muestra), permiten confirmar la saturación de la muestra, así como determinar la permeabilidad de la misma al agua (k_w). En la Fig. 4.30 se observa la variación del cambio de volumen de agua (que entra y sale de la muestra) en un tiempo determinado en ambos medidores, así como el equilibrio de la deformación volumétrica en la etapa de saturación en un lapso de aproximadamente 4.5 días, y en la Fig. 4.31 los diferentes valores de permeabilidad al agua (k_w). En el Anexo A, se describen los pasos previos y la metodología de los ensayos.

En los ensayos de colapso del grupo B, la inundación se hace por intrusión de agua a presión atmosférica hasta la saturación de la muestra. Se ejecutaron en el mismo equipo edométrico, donde se aplicó en una sola etapa la carga vertical (ω_v) a humedad constante. Una vez estabilizada la

deformación del suelo, se comenzó la saturación mediante agua a presión atmosférica. En la Tabla 4.13 y en la Fig. 4.22b se presentan las condiciones iniciales de los ensayos. En la Fig. 4.34 se indica la trayectoria de tensiones para ambos ensayos de colapso (grupo A y B). Los resultados, tanto los ensayos de colapso con control de succión como de intrusión de agua a presión atmosférica se resumen en la Tabla 4.14, en la que se indican las deformaciones volumétricas debido al proceso de carga (κ_{vc}) en cada ensayo. Se puede observar que la deformación por a la carga es mayor para los ensayos del grupo B, donde se aplicó en una sola etapa a humedad constante. Esta mayor deformación en el proceso de carga reduce la posibilidad posterior de colapso (κ_{vcol} menores). Por otro lado, los valores en la deformación vertical total ($\kappa_v = \kappa_{vc} + \kappa_{vcol}$), tanto en los ensayos del grupo A como los del B, presentan valores muy similares (Tabla 4.14 y Fig. 4.32).

Tabla 4.13 Condiciones iniciales de los ensayos de colapso. Grupo A: a succión controlada, y Grupo B: intrusión de agua a presión atmosférica.

Ensayo	w_0 %	Ψ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	$\Phi\#$ MPa	$\omega_m - u_a$ MPa
Grupo A*:						
A1a	11	1.64	0.653	46	0.8	0.6
A1b	11	1.65	0.640	46	0.8	0.6
A2	8	1.55	0.753	29	2.1	0.6
A3	11	1.52	0.789	38	0.9	0.3
A4	12.5	1.69	0.601	56	0.5	0.6
Grupo B*:						
B1a	11	1.65	0.642	46	0.8	0.6
B1b	11	1.65	0.645	46	0.8	0.6
B2	8	1.55	0.750	29	2.1	0.6
B3	11	1.52	0.787	38	0.9	0.3
B4	12.5	1.69	0.604	55	0.5	0.6

Nota: w_0 : humedad inicial; Ψ_{d0} : densidad seca inicial; $\omega_m - u_a$: esfuerzo media de compactación estática en condiciones isotropas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica); Sr_0 : grado de saturación inicial; e_0 : índice de poros inicial; *: A= control de succión matricial; B= intrusión de agua a presión atmosférica.

En los ensayos de colapso con intrusión de agua a presión atmosférica, el cambio de succión se evaluó a partir de los datos de los ensayos con control de succión, tomando como base que durante la etapa de carga la humedad se mantiene constante. Para determinar la evolución de la succión en la etapa de carga, se tomaron datos experimentales del proceso de carga ($e : \omega$, $Sr : \omega$), y de la trayectoria de humedecimiento ($e : s$, $Sr : s$), obteniendo las siguientes funciones:

$$\begin{aligned}
 e &= f(\omega, s) ; Sr = g(\omega, s) \\
 e &= e_0 + a_1 \ln(\omega) + b_1 \ln(s) + c_1 \ln(\omega) \ln(s) \\
 Sr &= Sr_0 + a_2 \ln(\omega) + b_2 \ln(s) + c_2 \ln(\omega) \ln(s)
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Considerando que la humedad es constante:

$$dw \mid de \quad Sr \quad 2 \quad e \quad dSr \mid 0
 \tag{4.9}$$

Se obtiene

$$Sr \left(\frac{e}{\omega} d\omega + 2 \frac{e}{s} ds \right) = 2 e \left(\frac{Sr}{\omega} d\omega + \frac{Sr}{s} ds \right) \quad (4.10)$$

Donde ω es el esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$); s la succión matricial ($u_a - u_w$); e el índice de poros, y Sr el grado de saturación. La relación entre la succión y la carga se obtiene integrando la ecuación (4.10).

En la Fig. 4.33 se hace la comparación entre los datos del ensayo A1a, y los obtenidos con la integración de la ecuación (4.10), en la evolución de la succión y del índice de poros en la etapa de carga vertical. En la Fig. 4.34 se observa el efecto de la reducción de la succión en la etapa de carga en los ensayos del grupo B, generando deformaciones de colapso menores que en los ensayos con control de succión.

Por otro lado, en los ensayos de colapso con control de succión (grupo A), en la Fig. 4.29 y 4.34 hacen ver que la deformación de colapso (κ_{vcol}) en las primeras etapas es poco importante, mientras que la κ_{vcol} en el cambio de succión de las dos últimas etapas (0.05 y 0.01 MPa) representan aproximadamente el 80% de la deformación volumétrica del colapso total. Esto se atribuye a una mayor reordenación de la estructura del suelo en las dos últimas etapas, debida a una mayor entrada de agua.

Tabla 4.14 Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de colapso, realizados en la nueva célula edométrica con control de succión.

Ensayo	$\omega_m - u_a$ MPa	$\omega_v - u_a$ MPa	ω_v MPa	e_1	ψ_{d1} g/cm ³	κ_{vc} (%)	κ_{vcol} (%)	κ_v (%)
Gpo. A:								
A1a	0.6	0.6		0.55	1.75	4.0	7.0	11.0
A1b	0.6	1.2		0.57	1.72	5.6	6.3	11.9
A2	0.6	0.6		0.66	1.63	5.1	10.4	15.5
A3	0.3	0.3		0.74	1.56	2.7	11.9	14.6
A4	0.6	0.6		0.52	1.78	4.8	4.5	9.3
Gpo B:								
B1a	0.6		0.6		1.76	6.2	6.5	12.7
B1b	0.6		1.2		1.79	8.2	4.3	12.5
B2	0.6		0.6		1.64	5.6	11.4	17.0
B3	0.3		0.3		1.60	5.0	10.2	15.2
B4	0.6		0.6		1.81	6.7	2.5	9.2

Nota: $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas; ω_v : presión vertical durante la saturación; $\omega_v - u_a$: presión vertical neta durante la etapa de mojado; ψ_{d1} : densidad seca antes de la saturación y con la presión vertical aplicada; e_1 : índice de poros con una densidad ψ_{d1} ; κ_{vc} : deformación volumétrica vertical durante el proceso de carga; κ_{vcol} : deformación volumétrica vertical de colapso; $\kappa_v = \kappa_{vc} + \kappa_{vcol}$.

El comportamiento del contenido de agua ($w\%$), se muestra en la Fig. 4.28, así como el grado de saturación (S_r), y la deformación de colapso (κ_{col}), en cada una de las etapas de la reducción de la succión antes de la saturación total en el ensayo A1a. En las dos últimas etapas del cambio de succión (0.05 y 0.01 MPa), hay mayor entrada de agua al suelo, ocupando los espacios intergranulares (macroporosidad), generando una reorganización importante de la estructura, y causando mayor deformación volumétrica de colapso. En la Fig. 4.29, del ensayo con intrusión de agua a presión atmosférica (B1a), se observa que toda la deformación de colapso se experimenta al inicio de la intrusión del agua. El ensayo con control de succión (A1a) y en el mismo intervalo de tiempo, la deformación de colapso es prácticamente nula.

En la Fig. 4.35 se presentan los resultados de los ensayos de colapso con control y sin control de la succión matricial, donde los suelos con un contenido de agua de compactación inicial (w_0) baja presentan la mayor deformación de colapso. Igualmente se observa la reducción de la deformación de colapso (κ_{col}) a medida que aumenta la magnitud de la carga vertical neta aplicada sobre el suelo. Por otro lado, los suelos con densidad seca al inicio de la saturación (ψ_{60}) baja, son los más propensos al colapso.

4.4.2 Ensayos de compresión isótropa en suelos saturados

En una tercera fase de ensayos previos se realizó un programa de ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas, que permitirán extraer pautas de comportamientos mecánicos en condiciones saturadas. Otro objetivo de este programa fue determinar los parámetros del modelo elastoplástico para suelos no saturados desarrollado por Alonso, *et al* (1990).

Las muestras se fabricaron mediante compactación estática en un molde cilíndrico con un diámetro de 50 mm y 100 mm de altura, con una densidad seca muy baja (1.2 g/cm^3). Posteriormente, se realizó la compactación estática en una cámara triaxial convencional a base de una presión isótropa. Después de compactadas se obtuvieron las probetas con un diámetro de 35 mm y una altura de 70 mm, por corte (la técnica de compactación y preparación de las muestras se indica en la sección 4.3.2). En la Tabla 4.15 y en la Fig. 4.22c se presentan las condiciones iniciales de cada ensayo realizado.

Tabla 4.15 Ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas, y sus condiciones iniciales.

Ensayo	$\omega_m - u_a$ MPa	w_0 %	ψ_{60} g/cm^3	e_0	S_{r0} %	$\Phi_{\#}$ MPa
1	0.6	11 \pm 0.2	1.65	0.645	46	0.8
2	0.6	8 \pm 0.2	1.55	0.744	29	2.1
3	0.3	11 \pm 0.2	1.54	0.754	40	0.9
4	0.6	12.5 \pm 0.2	1.68	0.613	54	0.5
5	1.2	11 \pm 0.2	1.75	0.547	54	0.6

Nota: w_0 : humedad inicial; ψ_{60} : densidad seca inicial; $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica); e_0 : índice de poros inicial.

Finalmente, se colocaron las probetas en la cámara triaxial convencional donde se saturaron mediante un flujo de agua, bajo un esfuerzo efectivo de 0.01 MPa. Durante este proceso, dado que la carga es muy baja las deformaciones resultaron muy pequeñas. Se continuó con incrementos del esfuerzo

efectivo mediante escalones hasta alcanzar un valor máximo de 1.3 MPa; en cada escalón se midió la evolución del cambio de volumen del suelo mediante el control del volumen de agua que salía de la muestra (deformación volumétrica total). En la Fig. 4.37 se presenta la evolución temporal de la deformación volumétrica (κ_v) causada por incrementos del esfuerzo efectivo ($\omega_m - u_w$), donde cada etapa de carga efectiva (0.01, 0.03, 0.06, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 y 1.3 MPa) se mantuvo aproximadamente por dos días. En la Fig. 4.23 se describe la trayectoria de esfuerzos en estos ensayos.

La Fig. 4.36 corresponde a la relación entre el índice de poros y el esfuerzo efectivo de confinamiento obtenida en los ensayos saturados de compresión isotropa, según las condiciones iniciales indicadas en la Tabla 4.15. El esfuerzo de preconsolidación en estado saturado (p_0^*) se obtuvo de la zona cercana al quiebro, o transición de la curva de recompresión a la virgen (Fig. 4.38). Los resultados se resumen en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Parámetros obtenidos de los ensayos de carga isotropa.

Ensayo	$\omega_m - u_a$ MPa	m_v Cm ² /kg	c_v cm ² /min	# ρ	$\zeta(0)$	p_0^* MPa
1	0.6	1.10	0.014	0.0110	0.0730	0.071
2	0.6	1.16	0.0154	0.0116	0.0735	0.038
3	0.3	1.09	0.0221	0.0115	0.0753	0.039
4	0.6	1.04	0.0079	0.0114	0.0734	0.124
5	1.2	0.67	0.0036	0.0107	0.0700	0.256

Nota: m_v : coeficiente de variación volumétrica; c_v : coeficiente de consolidación; ρ : pendiente del tramo de descarga; $\zeta(0)$: pendiente de la curva $e - \ln(\omega_m - u_w)$ en el tramo virgen; $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas.

Los parámetros del modelo elastoplástico (Alonso, *et al.*, 1990), $\zeta(0)$ y ρ se escogieron a partir de la deformabilidad en carga y descarga medida en los ensayos de compresión isotropa (Fig. 4.36). En los mismos ensayos se midió el valor de p_0^* . Dado que la compactación ha sido isotropa y la succión se ha medido tras el proceso de compactación, las condiciones iniciales p_0 y s_0 en el modelo son conocidas. Usando conjuntamente los valores de p_0 y p_0^* de cada ensayo, y la magnitud de los colapsos medidos en los ensayos edométricos, se puede definir la forma genérica de la curva LC (ec. 4.12), lo que proporciona los valores de r , η y p^c (ec. 4.11).

$$\zeta/s_0 = \zeta(0) \left[\frac{p_0/s_0}{p^c} \right]^{1/r} \exp\left[\frac{\eta}{4} \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\rho} \right] \quad (4.11)$$

$$LC: \left[\frac{p_0/s_0}{p^c} \right]^{1/r} \left[\frac{p_0^*}{p^c} \right]^{\eta/4 \rho} \Psi/s_0 \rho \beta \quad (4.12)$$

En la Tabla 4.17 se recogen los valores de los distintos parámetros del modelo utilizados en la simulación numérica de los resultados experimentales de los ensayos 1 y 5 (Alonso, *et al.*, 1990). En la Fig. 4.39a se muestra la forma adoptada de la superficie de fluencia tras la compactación isotropa (LC inicial), y su desplazamiento por el incremento del esfuerzo (LC final) de los ensayos 1 y 5.

Tabla 4.17 Parámetros del modelo utilizados para el análisis de los ensayos saturados y de colapso.

$\zeta (0)$	ρ	$\eta\#$ (1/MPa)	r	p^c (kPa)
0.073	0.011	3	0.8	2

Usando los parámetros de la Tabla 4.17 se reprodujeron con el modelo BBM los ensayos de colapso, bajo inundación a carga constante. En la sección anterior (4.4.1.1) se describen los ensayos de colapso y las trayectorias seguidas. En la Tabla 4.11 y en la Fig. 4.22a del plano Próctor se presentan las condiciones iniciales de las muestras. Hay que tener presente que el modelo se formuló en términos de esfuerzo medio (p), y en los ensayos de colapso se utiliza carga vertical (ω).

En la Fig. 4.39b se presentan las curvas experimentales en el espacio $p : e$ comparadas con las curvas obtenidas por el modelo. Las muestras corresponden a los ensayos de compresión isótropa 1 y 5, en los que el suelo se somete a una carga de 1.3 MPa. Se observa que la predicción se ajusta razonablemente bien a los ensayos experimentales.

Por su parte, en la Fig. 4.39c se presentan en el plano $e : \omega$ dos ejemplos correspondientes a los ensayos de colapso, bajo inundación a carga constante B1 y C4 comparados con las curvas obtenidas por el modelo. Como se puede ver, existe una buena correspondencia entre cada resultado experimental obtenido y las predicciones de la deformación de colapso.

Como se ha mencionado, con los parámetros iniciales p_0 y s_0 , y con la expresión 2.30 se determina el valor de la presión de preconsolidación equivalente en condiciones de saturación (p_0^*) asociada a cada estado inicial (tras el proceso de compactación). En la Tabla 4.11 se recogen los valores de las condiciones iniciales para la modelación de ensayos de colapso. Utilizando estas condiciones iniciales, y reproduciendo la trayectoria de carga a humedad constante y de saturación a carga vertical constante, se obtuvieron los valores de las deformaciones de colapso indicadas en la Fig. 4.39d, e la cual se puede constatar cómo los valores del colapso que se han calculado corresponden, en general, con los valores medidos.

4.5 Ensayos previos de comportamiento de rotura en suelos saturados

4.5.1 Trayectorias de esfuerzos y programa de ensayos triaxiales en muestras saturadas

En esta sección se describen las trayectorias en los ensayos triaxiales de compresión, bajo condiciones drenadas en muestras saturadas, utilizando la célula Triaxial GDS Instrument Ltd., descrita en la sección 3.4. Esto permitió extraer pautas de comportamiento mecánico en condiciones saturadas con la finalidad de validar la bondad de las hipótesis en el modelo conceptual constitutivo. El objetivo específico del programa de ensayos fue determinar la forma de la superficie de fluencia de este material con datos de la consolidación y de la etapa de rotura, además de evaluar los parámetros intrínsecos de resistencia de las muestras.

El programa consistió endiez ensayos triaxiales en muestras saturadas identificados con las letras CD, mientras que los números hacen referencia en forma general a la descripción del ensayo. Las centenas indican el punto de esfuerzo del estado inicial de la muestra a ensayar, y la unidad indica la trayectoria

en el ensayo (Fig. 4.40). En la Tabla 4.19 se resumen los detalles del programa experimental en los que se invirtió un periodo aproximadamente de 90 días de trabajo. En la sección 4.3.2 se menciona la técnica de fabricación de las probetas cilíndricas ($\lambda = 38$ mm, $h = 76$ mm) empleadas, y en la Tabla 4.18 los valores del estado inicial de las muestras; en la Fig. 4.40 se presentan en el plano Próctor (w %, ψ_{60}).

Se realizaron cuatro trayectorias diferentes en las muestras con un estado inicial de $\psi_{60} = 1.65$ g/cm³ y un contenido de agua de 11.0 ± 0.02 % (punto de esfuerzo CD-100, Fig. 4.40). En el resto de las muestras cuyas condiciones iniciales se muestran en los puntos de esfuerzo CD – 200, 300 y 400 (Fig. 4.40) se realizaron dos trayectorias diferentes.

Las muestras se saturaron mediante un flujo de agua desaerada y desmineralizada, bajo un esfuerzo de confinamiento de 0.01 MPa. El proceso de saturación comenzó con una presión de cámara de 0.02 MPa y una presión de agua intersticial por debajo de la muestra de 0.01 MPa, dejando una línea de drenaje por encima de la muestra a presión atmosférica. Esta etapa de saturación se muestra en la Fig. 4.41. Durante el proceso de saturación (aproximadamente cuatro días), la presión de cámara se mantuvo constante a 0.02 MPa, monitoreando el agua que entraba en la muestra. Una vez saturada la muestra se realizaron las siguientes trayectorias.

Tabla 4.18 Estado inicial de las muestras. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (célula triaxial estándar, GDS).

Ensayo	w_0 %	ψ_{60} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	σ_v # MPa	$\sigma_m - u_a$ MPa	p_0^* # MPa#
CD – 101	11.0 ± 0.2	1.67	0.627	47.5	0.80	0.60	0.07
CD – 102	11.0 ± 0.2	1.66	0.629	47.0	0.80	0.60	0.07
CD – 103	11.0 ± 0.2	1.66	0.633	47.0	0.80	0.60	0.07
CD – 104	11.0 ± 0.2	1.66	0.627	47.5	0.80	0.60	0.07
CD – 201	8.0 ± 0.2	1.54	0.764	28.0	2.10	0.60	0.038
CD – 202	8.0 ± 0.2	1.53	0.767	28.0	2.10	0.60	0.038
CD – 301	11.0 ± 0.2	1.53	0.767	39.0	0.90	0.30	0.039
CD – 302	11.0 ± 0.2	1.53	0.764	39.0	0.90	0.30	0.039
CD – 401	12.5 ± 0.2	1.71	0.588	57.5	0.50	0.60	0.124
CD – 402	12.5 ± 0.2	1.71	0.585	58.0	0.50	0.60	0.124

$\sigma_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas; σ_v : succión total inicial (técnica psicrométrica); p_0^* # esfuerzo de preconsolidación en condiciones saturadas

Trayectoria 1: se comenzó con una presión de confinamiento de 110 kPa y una presión intersticial de agua de 100 kPa. Las muestras se consolidaron ejecutando una rampa de incrementos de presiones, bajo una condición de $K_0 = \sigma'_3 / \sigma'_1 = 0.5$ hasta alcanzar el esfuerzo medio máximo especificado (referirse a la Tabla 4.19 y punto de esfuerzo B de la Fig. 4.42). La rotura drenada se impuso en una trayectoria de compresión. Las etapas de consolidación y rotura se realizaron lo suficientemente lentas

como para garantizar excesos de presión intersticial de agua (u_w) menores de 10 kPa. En la Fig. 4.42 se muestra la trayectoria 1 en el plano ($p' = \sigma_m - u_w, q$).

Trayectoria 2: ésta trayectoria se inició con una presión de confinamiento de 110 kPa y una presión intersticial de agua de 100 kPa. Seguidamente, bajo estas presiones se comenzó con la rotura drenada en una trayectoria de compresión con control de exceso de presión de poros. En la Fig. 4.43 se muestra la trayectoria 2 en el plano (p', q).

Tabla 4.19 Programa experimental de ensayos triaxiales en muestras saturadas.

Ensayo	Descripción (etapa de consolidación)	Rotura, q_{\max} (MPa) comp. triaxial, ($\div q/\div p' = 3$)	Tiempo (días)
CD – 101*	$K_0=0.5, p'_{\max}=0.864$ MPa	0.86 MPa	12
CD – 201	$K_0=0.5, p'_{\max}=0.872$ MPa	1.21 MPa	9.0
CD – 301	$K_0=0.5, p'_{\max}=0.653$ MPa	0.68 MPa	8.3
CD – 401	$K_0=0.5, p'_{\max}=0.921$ MPa	1.11 MPa	8.2
CD – 102	$p'_{\max}=0.01$ MPa, $q=0$ MPa	0.045 MPa	5.5
CD – 202	$p'_{\max}=0.01$ MPa, $q=0$ MPa	0.041 MPa	5.3
CD – 302	$p'_{\max}=0.01$ MPa, $q=0$ MPa	0.042 MPa	6.0
CD – 402	$p'_{\max}=0.01$ MPa, $q=0$ MPa	0.054 MPa	6.0
CD – 103	$p'_{\max}=0.6$ MPa, $q=0$ MPa	1.20 MPa	14.8
CD – 104	$p'_{\max}=1.20$ MPa, $q=0$ MPa $p'_{\min}=0.10$ MPa, $q=0$ MPa	0.277 MPa	12.6

* las centenas indican el punto de esfuerzo del estado inicial (Fig. 4.40), la unidad indica la trayectoria realizada.

Trayectoria 3: comenzó con una presión efectiva de 10 kPa. Posteriormente, la muestra se sometió a una compresión isotrópica en rampa hasta una presión efectiva de $(\sigma_m - u_w) = 0.6$ MPa (esfuerzo de preconsolidación obtenida en el proceso de compactación) (punto de esfuerzo B de la Fig. 4.44). Enseguida se comenzó con la rotura drenada en una trayectoria de compresión con control de exceso de presión de poros. En la Fig. 4.44 se muestra la trayectoria 3 en el plano (p', q).

Trayectoria 4: consistió en partir de un esfuerzo efectivo de 10 kPa, después de una rampa de saturación. En la primera etapa, la muestra fue sometida a una carga isotrópica en rampa hasta un esfuerzo efectivo de $(\sigma_m - u_w) = 1.20$ MPa (punto de esfuerzo B de la Fig. 4.45). Posteriormente el esfuerzo efectivo se disminuyó en rampa hasta un valor de $(\sigma_m - u_w) = 0.10$ MPa (punto de esfuerzo C). La etapa de carga y descarga se realizó en condiciones drenadas, con un control de la velocidad de incremento o disminución del esfuerzo efectivo para mantener un valor de la presión intersticial menor o igual a 10 kPa. Se continuó con la rotura drenada en una trayectoria de compresión con control de exceso de presión de poros. En la Fig. 4.45 se muestra la trayectoria 4 en el plano (p', q).

En las trayectorias 1, 2 y 3 se trató de ver el efecto de unas condiciones iniciales conocidas caracterizando la posición de la superficie de fluencia de un suelo saturado (Fig. 4.46). En la trayectoria 4 se busca caracterizar el efecto de la preconsolidación isotrópica en el comportamiento de rotura del suelo saturado.

4.5.2 Ensayos triaxiales en muestras saturadas

En esta sección se presentan los resultados de la fase previa de ensayos orientados al análisis del comportamiento en rotura de muestras saturadas. El objetivo principal del programa fue determinar la forma de la superficie de fluencia para este material, y los módulos elásticos en muestras saturadas.

En la Fig. 4.47, aparecen los resultados obtenidos del ensayo CD-101, y en la Fig. 4.49 del ensayo CD-102 en términos del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incremento de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_l). Se observa que el incremento de la presión de poros (Δu) es controlado durante todo el ensayo para garantizar el esfuerzo efectivo sobre la muestra.

La Fig. 4.48 (ensayo CD-101) señala la deformación volumétrica (κ_v) con respecto al esfuerzo medio efectivo ($p' = 1/3(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$). En la etapa A-B del ensayo de este gráfico se obtiene el esfuerzo de preconsolidación ($p_0^* = 57.8$ kPa). En la misma figura en el plano $p' : q$ se observa que la relación en la etapa de compresión (A-B) se llevó a cabo, bajo una relación de $(\tau/q/p') = 0.80$, y en la etapa de rotura (B-C) a deformación constante de $(\tau/q/p') = 2.9$.

De la *trayectoria 2* del ensayo CD-102, se logra un punto más de la superficie de fluencia, así como los módulos elásticos. En la Fig. 4.50 se muestra la determinación gráfica del esfuerzo de preconsolidación ($p_0^* = 25.5$ kPa) en el plano $p' : \kappa_v$, obtenida de la zona cercana al quiebro o transición de la curva. En la Fig. 4.50 en el plano $p' : q$, se observa que para el valor de p_0^* determinado en el plano $p' : \kappa_v$ le corresponde un valor del esfuerzo desviador ($q = 46.5$ kPa), valor que puede ser constatado en el plano $q : \kappa_s$ de la Fig. 4.51, donde se indican los módulos elásticos en condiciones saturadas. G: módulo de corte; E : módulo de Young; ν : módulo de Poisson. En la Tabla 4.20 se resumen los valores de los parámetros y los módulos elásticos del programa de ensayos.

Por su parte, la Fig. 4.52 representa la influencia de la presión de confinamiento (σ_3) en los módulos elásticos, y en la Fig. 4.53, en el plano esfuerzo medio efectivo–esfuerzo desviador ($p' : q$) la superficie de fluencia, expresada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\left(\frac{p_0^*}{2}\right)^2 + \frac{q^2}{2}}{\left(\frac{p_0^*}{2}\right)^2} = 1 \quad (4.13)$$

Donde:

$$M \mid \frac{6 \operatorname{sen} \lambda \mathfrak{R}}{3 - \operatorname{sen} \lambda \mathfrak{R}} \quad (4.14)$$

Se obtuvo (n) valor de $\lambda' = 29 \forall (M = 1.15)$. En la Fig. 4.53 los símbolos representan los datos obtenidos en este programa de ensayos, mientras que las líneas continuas corresponden a la ecuación 4.13. Los símbolos con las coordenadas en $q = 0$, se dedujeron del programa de ensayos de compresión isótropa.

En la Fig. 4.55, se muestra el ensayo CD-104 en el plano $p' : q$. En este ensayo, la muestra se sometió inicialmente a una compresión isótropa hasta un valor de $p' = 1.2$ MPa; posteriormente se realizó la descarga hasta un valor de 0.10 MPa, para comenzar la fase de rotura ($\tau/q \mid p' = 3.15$). Por otro lado, también se determinaron los módulos elásticos de las curvas esfuerzo-deformación. En el Anexo D, se incluyen los gráficos para los ensayos CD-200, CD-300 y CD-400, tomando los mismos criterios para determinar los parámetros expuestos en esta sección.

Tabla 4.20 Valores de fluencia, parámetros elastoplásticos y módulos elásticos del suelo en condiciones saturadas.

Ensayo	p_0^* MPa	q MPa	E MPa	G MPa	τ	K MPa	$\zeta(0)$	#p
CD-101	0.058	0.038						
CD-102	0.025	0.046	4.2	1.6	0.33	4.1	0.086	
CD-103	0.071	0.0						
CD-104	0.071	0.0	29	10	0.42	58	0.088	0.015
CD-201	0.032	0.016						
CD-202	0.016	0.022	4.1	1.6	0.26	2.8		
CD-301	0.033	0.017						
CD-302	0.016	0.021	4.8	1.9	0.24	3.1		
CD-401	0.075	0.064						
CD-402	0.029	0.057	7.4	2.8	0.32	6.8		

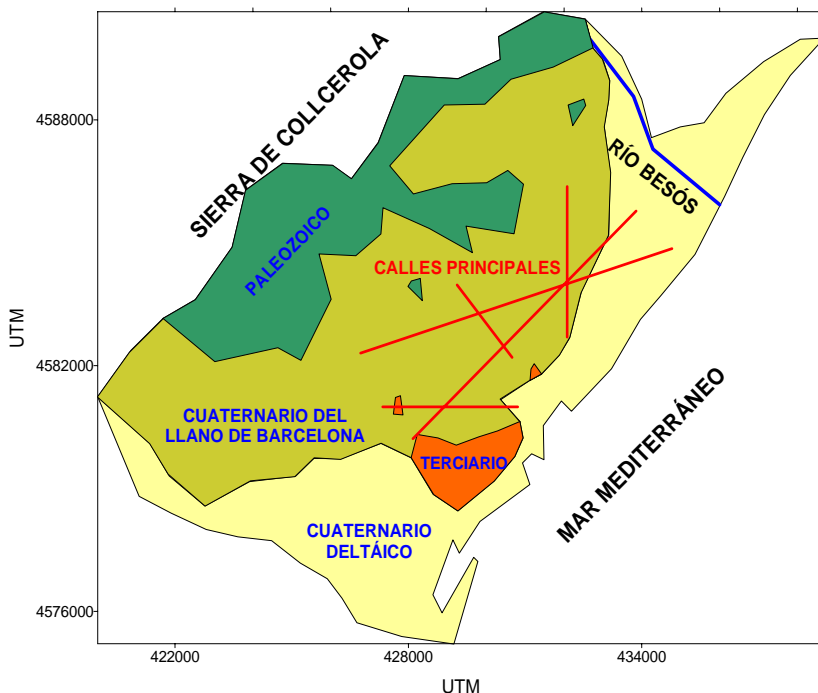


Figura 4.1 Esquema geológico de la ciudad de Barcelona (Vázquez-Suñé, E. 1998).

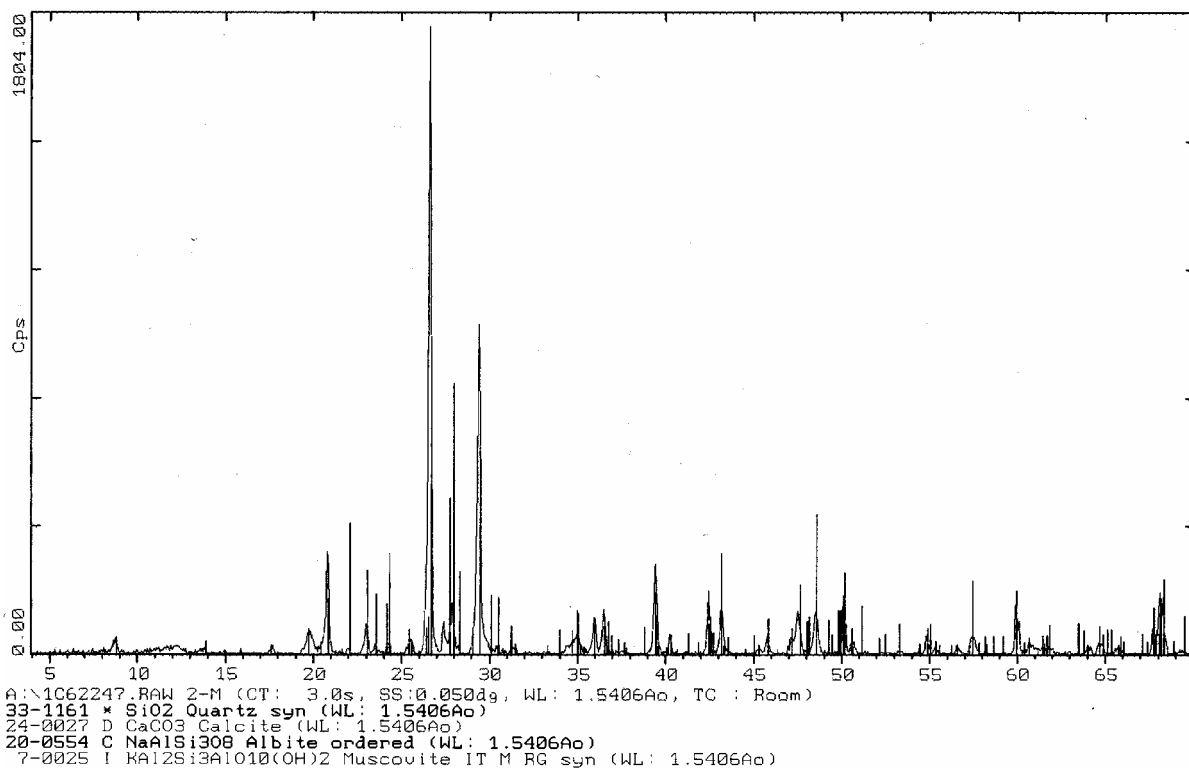


Figura 4.2 Difracción de rayos – X de la arcilla de baja plasticidad de Barcelona.



Figura 4.3 Microscopio electrónico de barrido ambiental, Electroscan 2020 (ESEM).

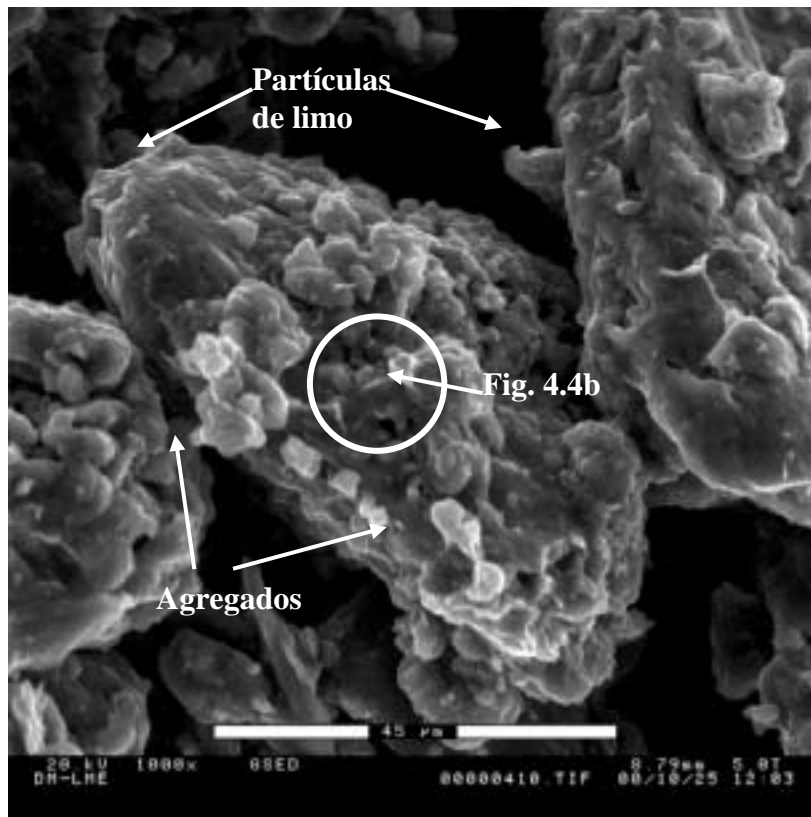


Figura 4.4a Suelo compactado en condiciones isotropas ($\psi_d=1.65\text{g/cm}^3$, $w_0=11\text{d}0.2\%$ y $n=40\%$), aumento x1000.

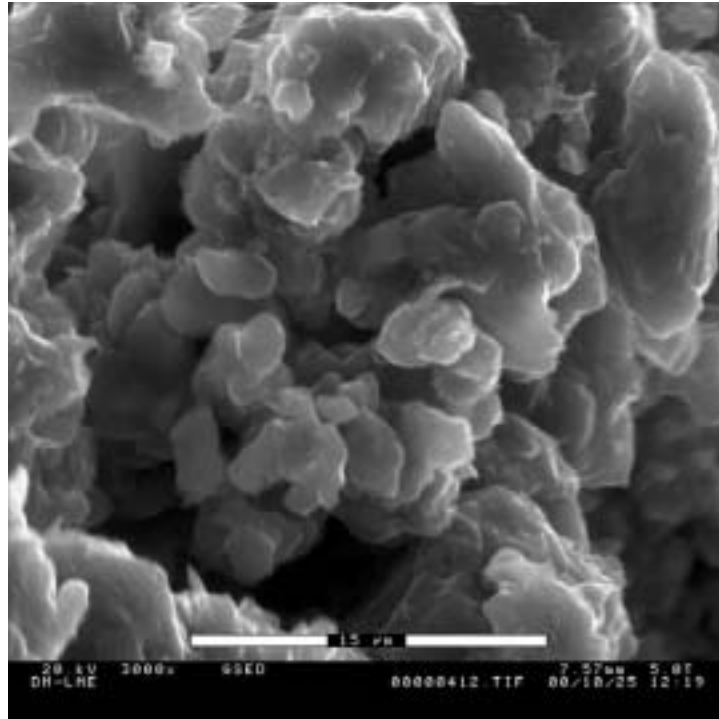


Figura 4.4b Aumento de la Fig. 4.4a x 3 000; agregados de partículas.

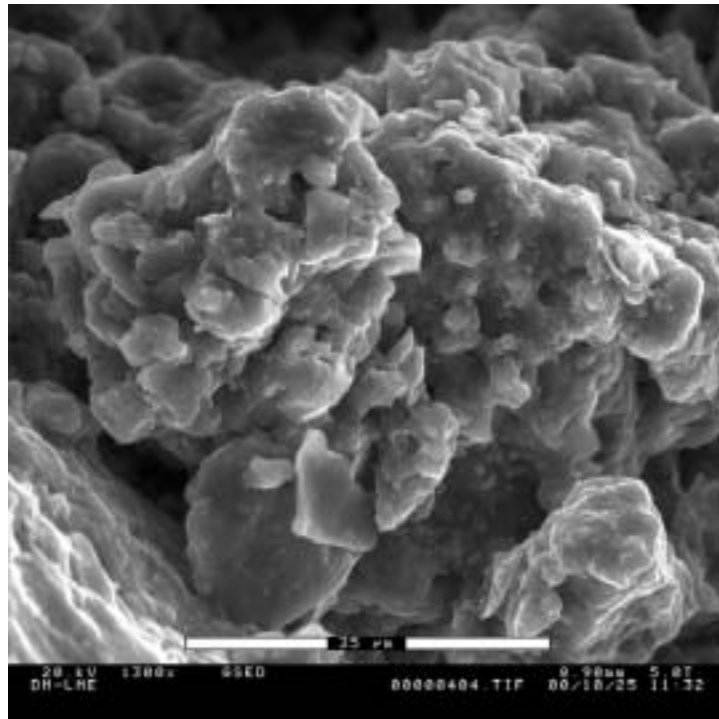


Figura 4.4c Estructura del suelo colapsado, bajo inundación ($\psi_d=1.53 \text{ g/cm}^3$, $w=8.0 \%$ y $n=42 \%$).

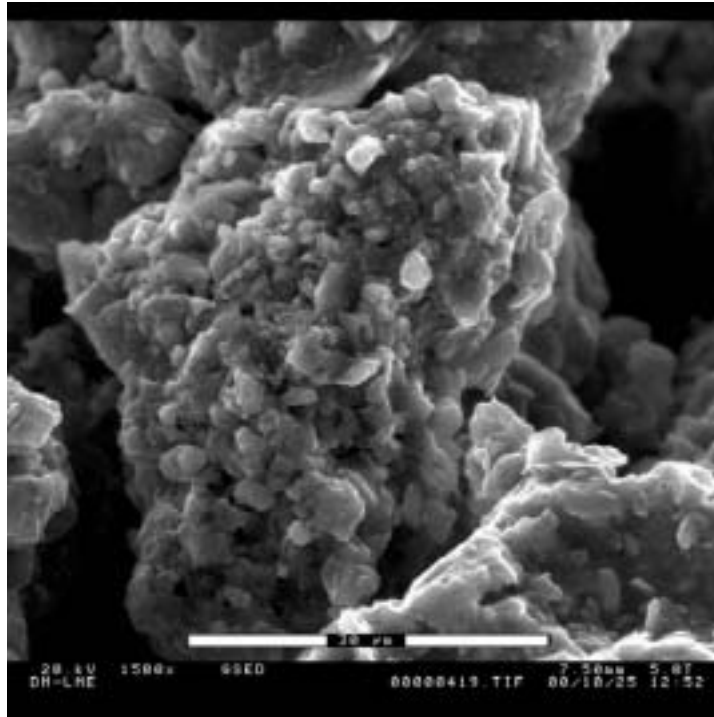


Figura 4.4d Estructura de suelo colapsado, bajo el proceso de hidratación por etapas ($\psi_d=1.53 \text{ g/cm}^3$, $w=8.0 \%$ y $n= 42\%$).



Figura 4.5 Porosímetro por intrusión de mercurio (Micromeritics).

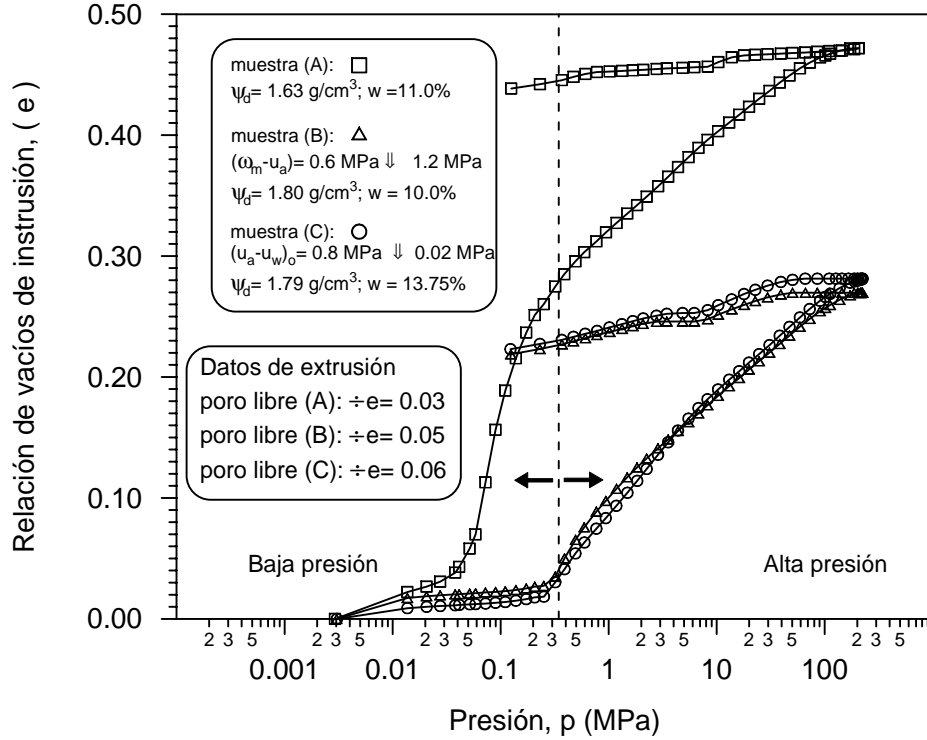


Figura 4.6 Intrusión acumulada de la relación de vacíos.

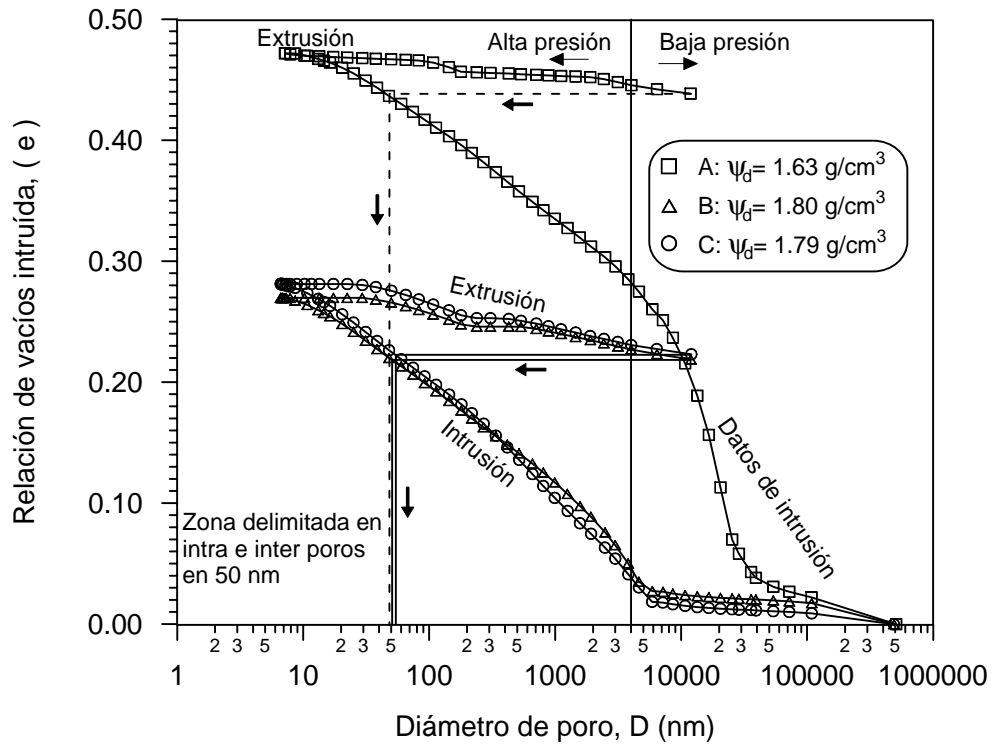


Figura 4.7 Distribución del tamaño de poros para diferentes condiciones.

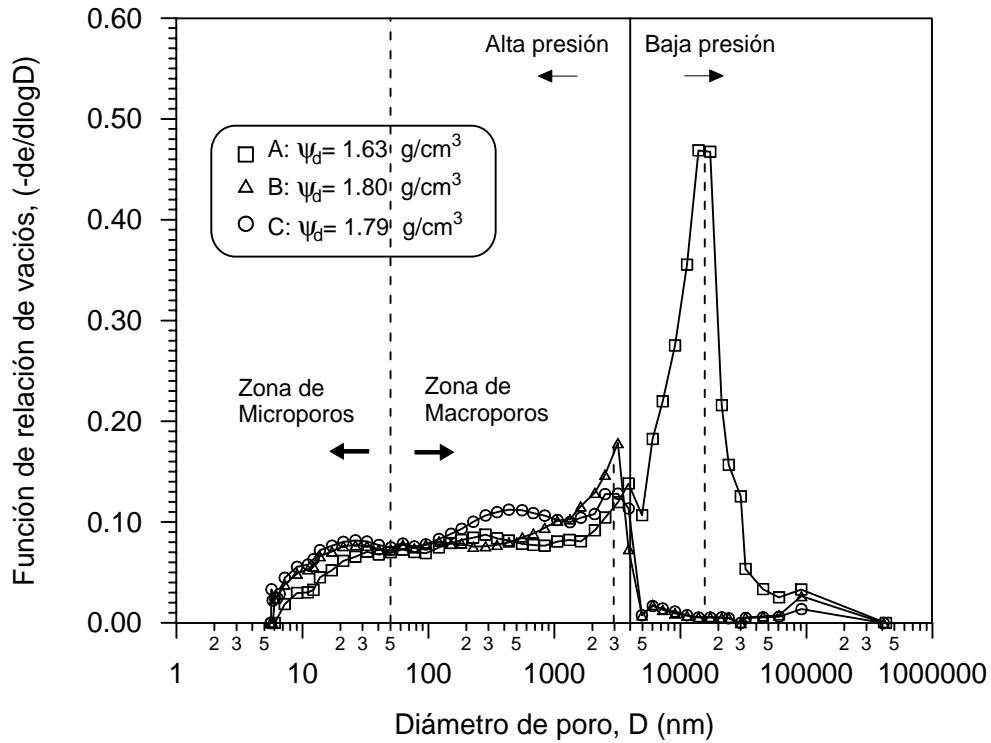


Figura 4.8 Distribución de tamaños de partículas del suelo para diferentes condiciones (MIP).

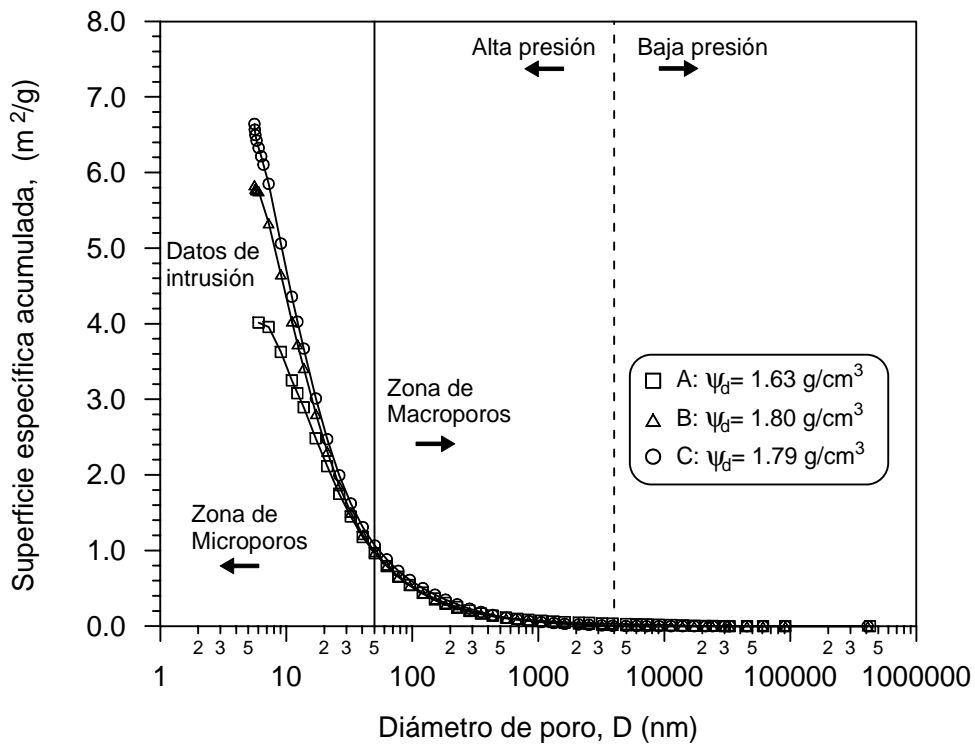


Figura 4.9 Superficie específica para diferentes condiciones, usando la técnica MIP.

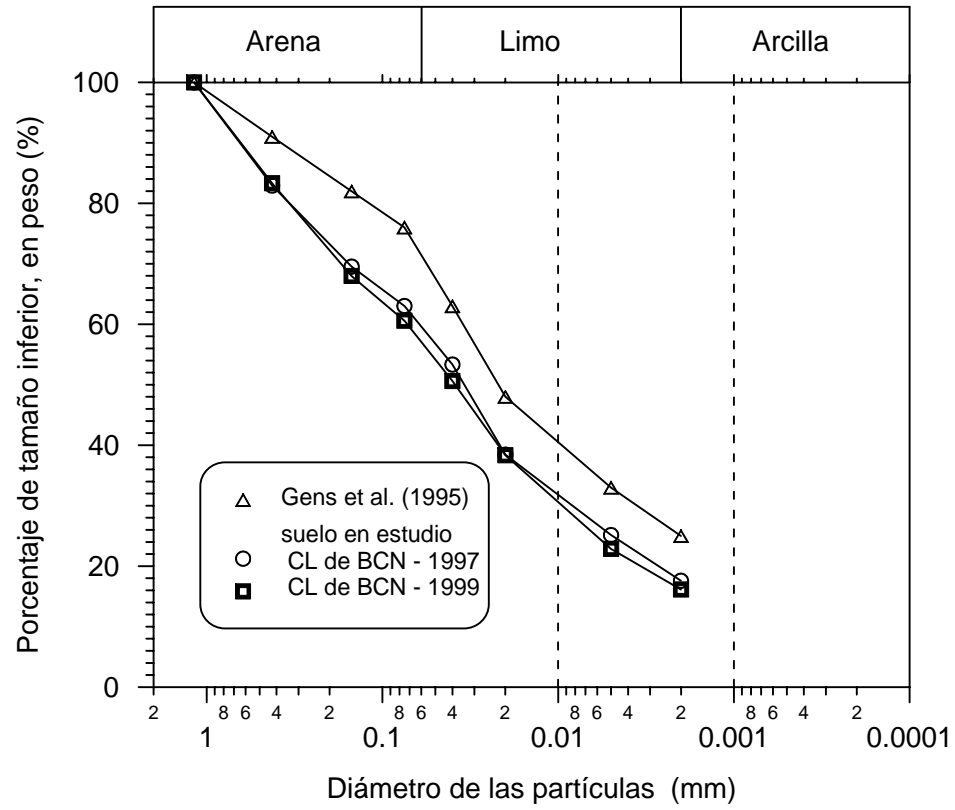


Figura 4.10 Curva granulométrica para el suelo en estudio (CL de Barcelona).

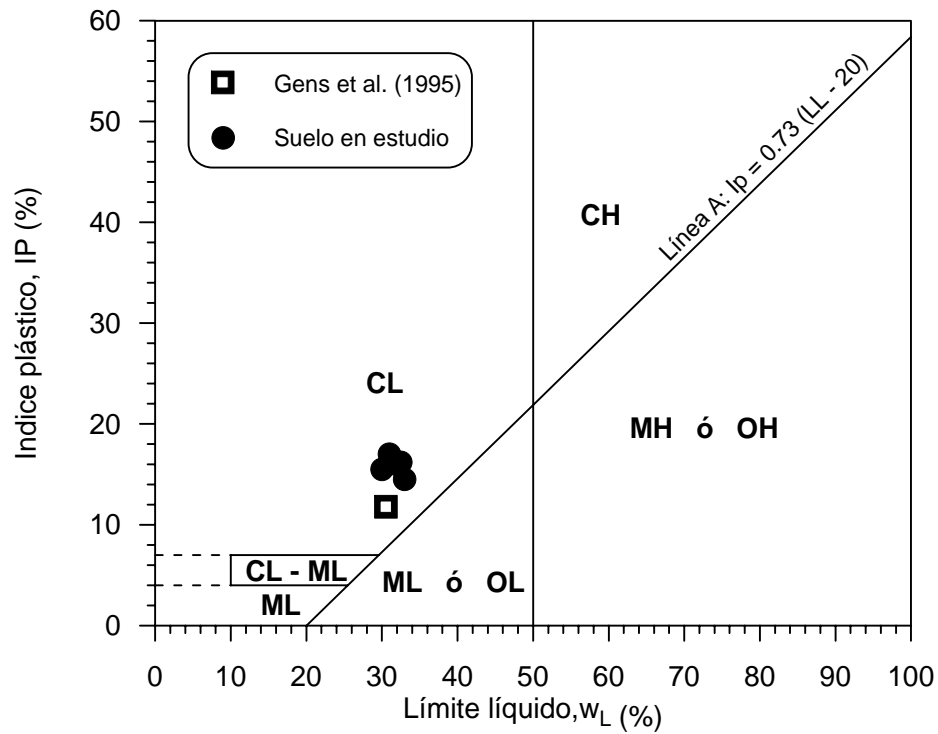


Figura 4.11 Carta de plasticidad.

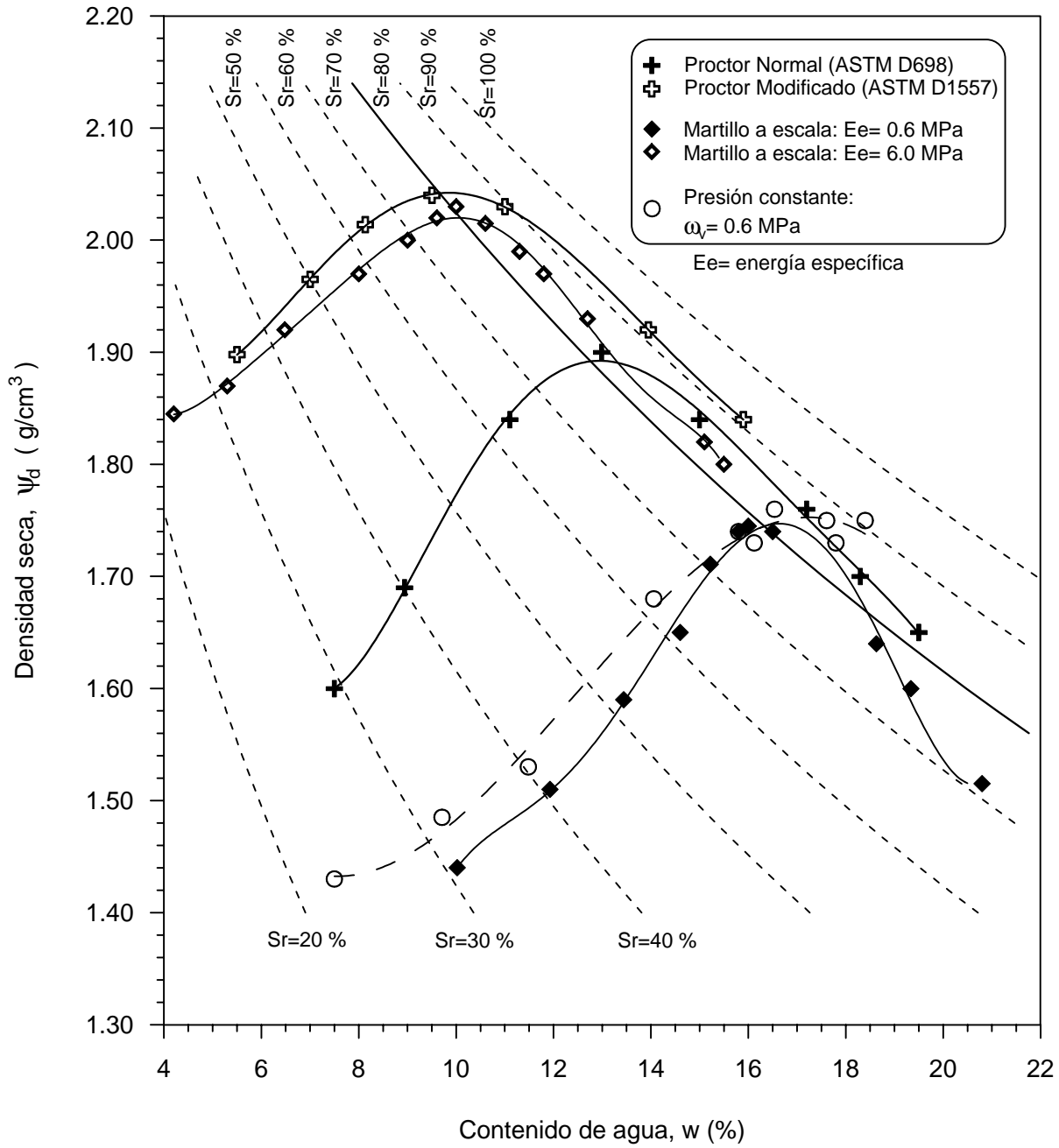


Figura 4.12 Curvas de compactación para diferentes niveles de energía específica.

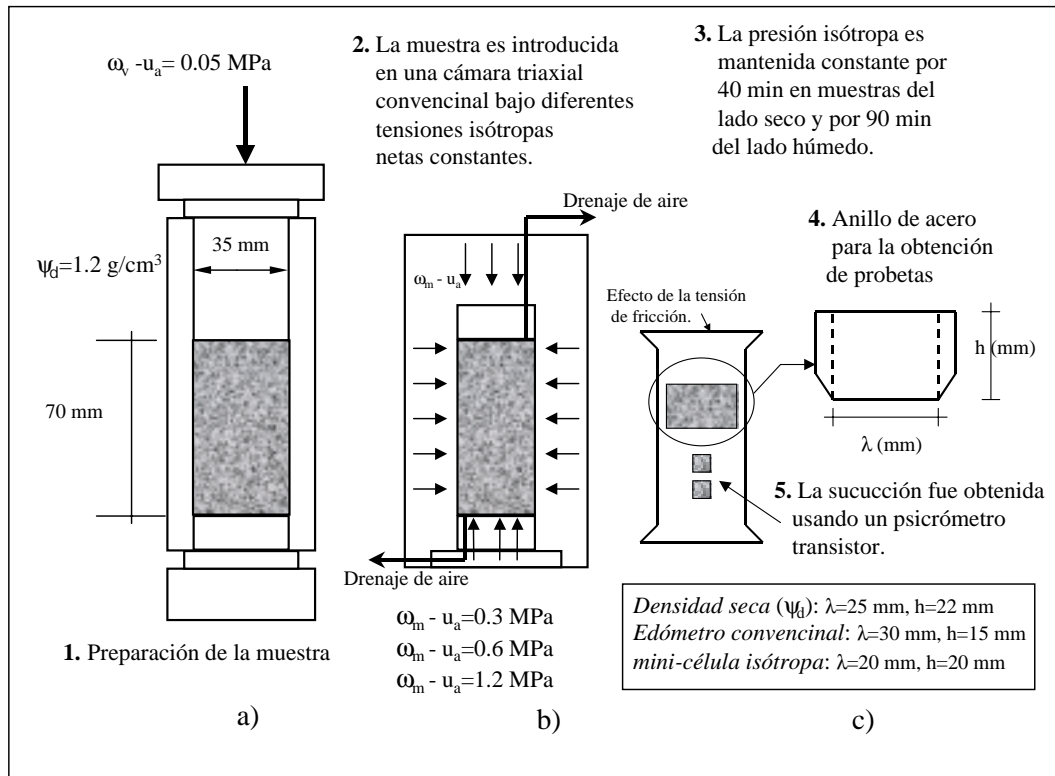


Figura 4.13 Procedimiento de compactación estática isotropa (esfuerzo controlado).

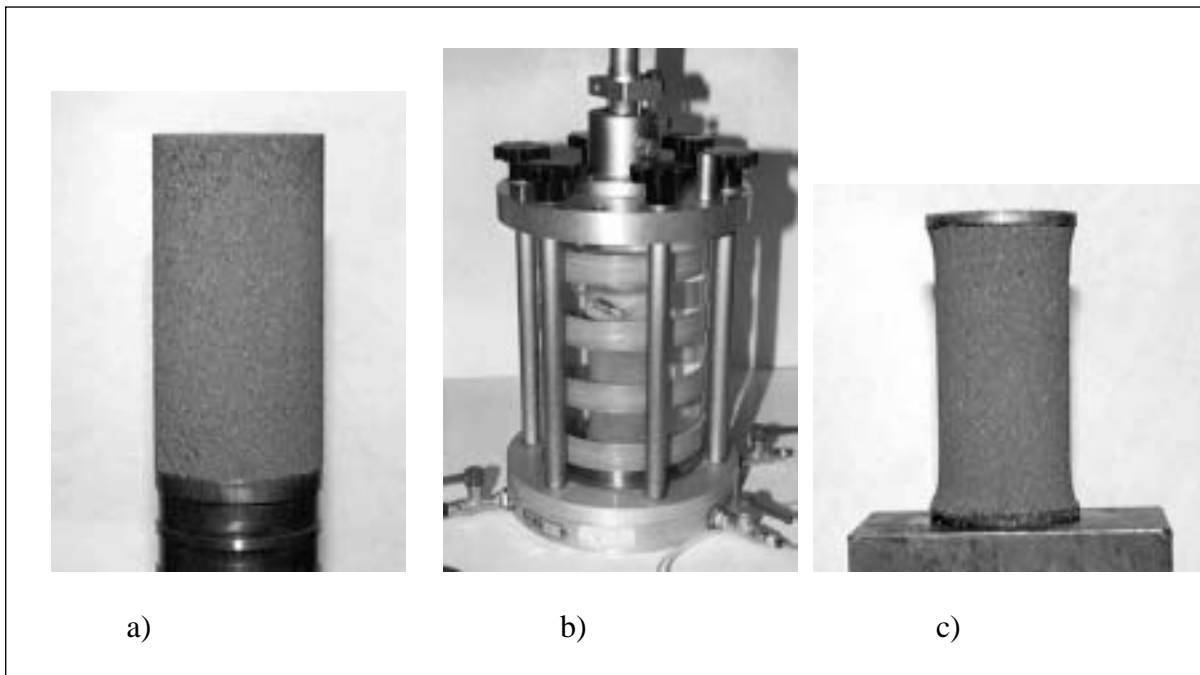


Figura 4.14 Fotografías de las etapas del procedimiento de compactación isotropa.

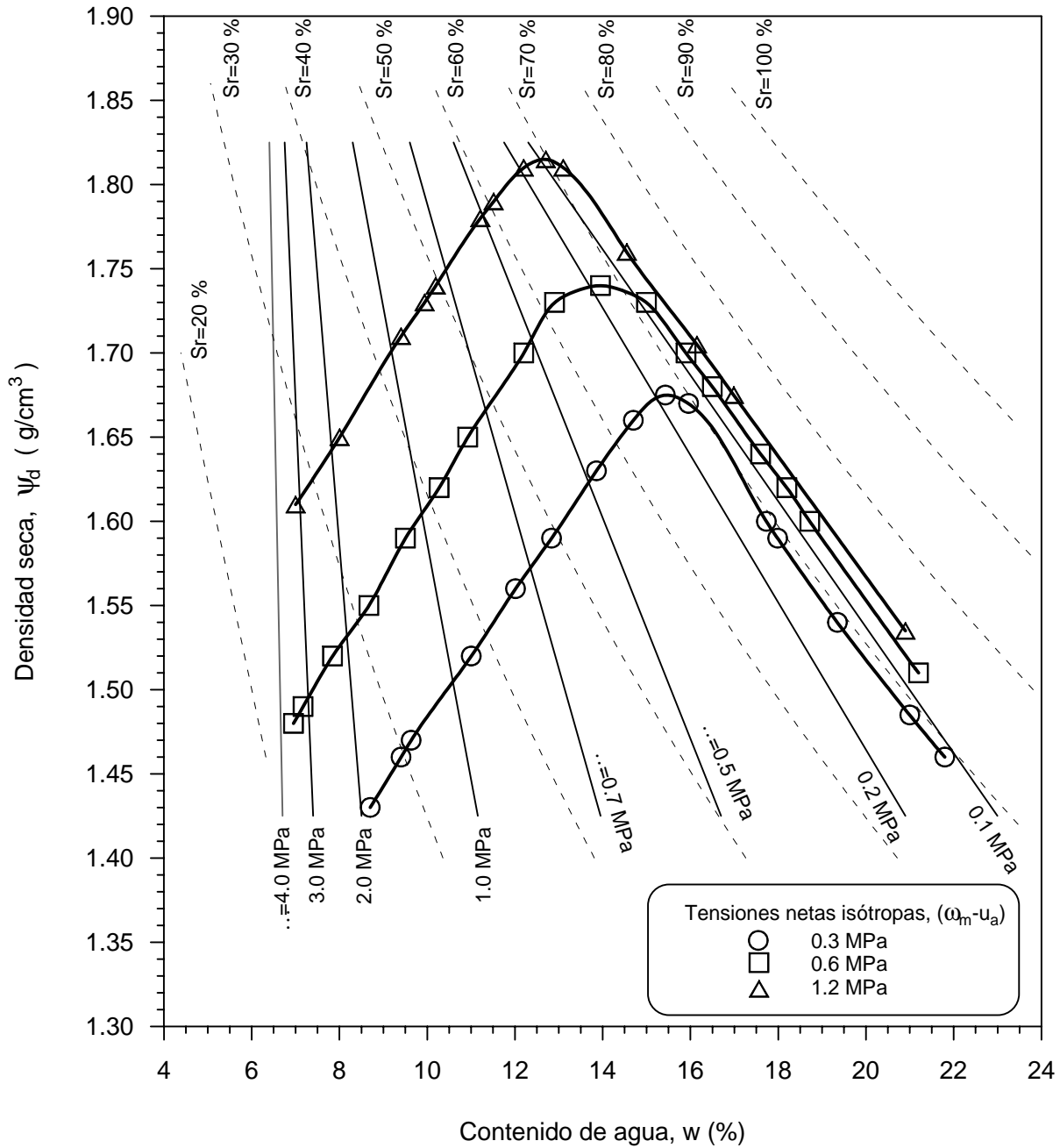


Figura 4.15 Curvas de compactación para tres presiones isotrópicas (para el suelo en estudio, arcilla de baja plasticidad de BCN). Las líneas sólidas indican los contornos de igual succión total después de la compactación.

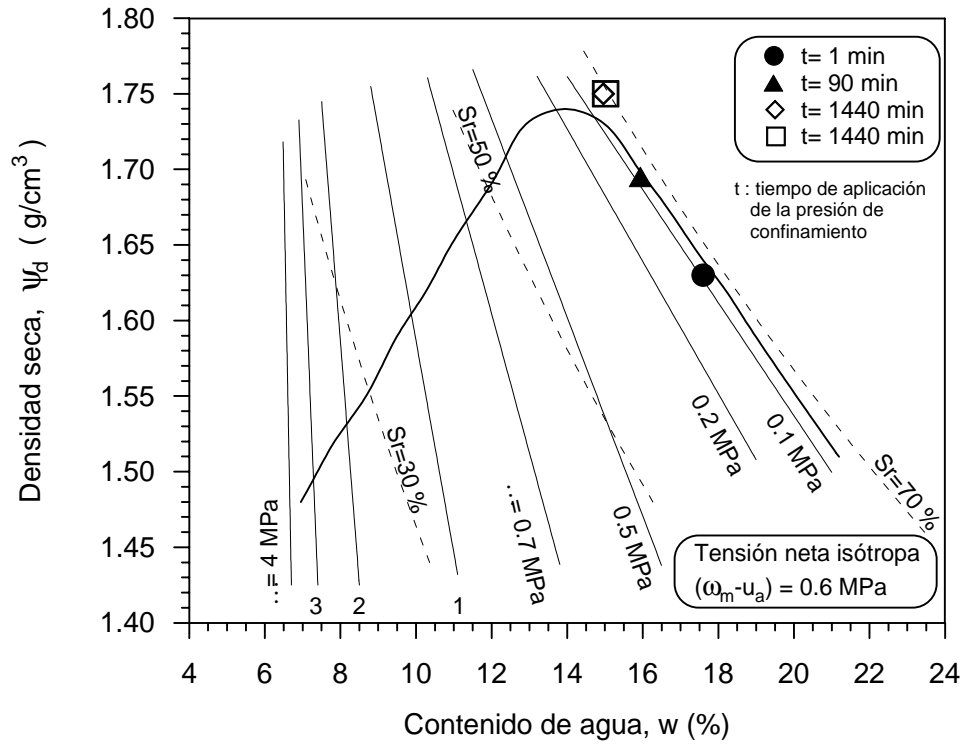


Figura 4.16 Comprobación del tiempo de aplicación de la presión isotrópica y la disipación del exceso de presión de poros.

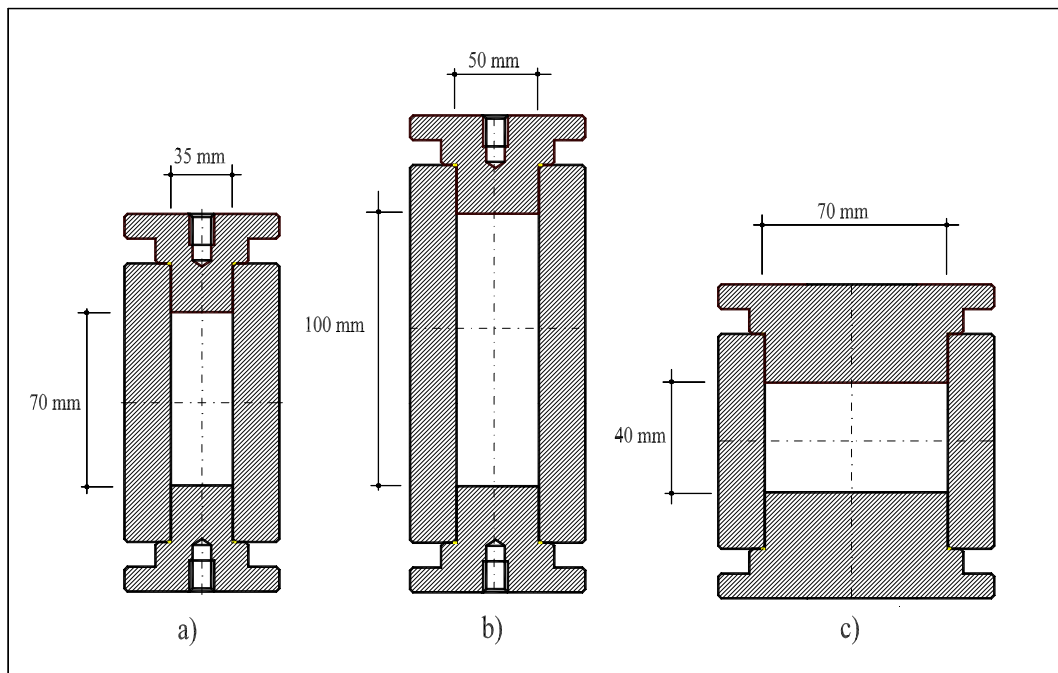


Figura 4.17 Moldes cilíndricos utilizados para la fabricación de probetas en la primera etapa de la compactación estática en condiciones isotrópicas.

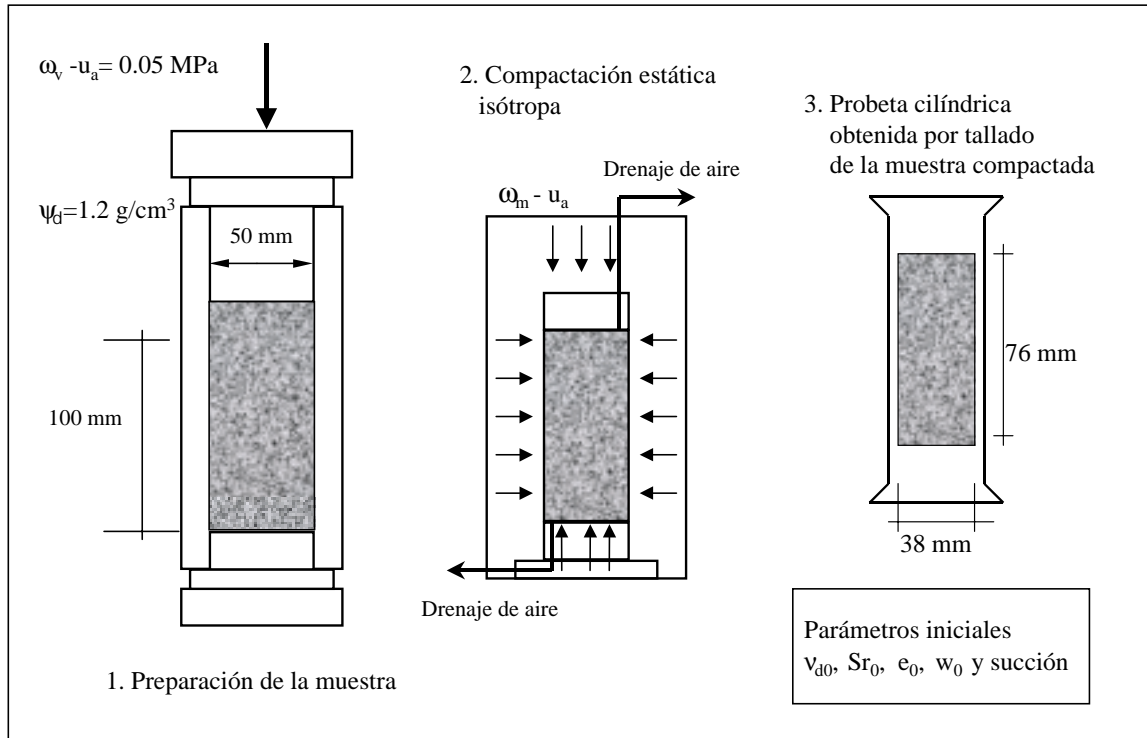


Figura 4.18 Técnica de preparación de las muestras a ensayar ($\lambda=38 \text{ mm}$, $h= 76 \text{ mm}$).

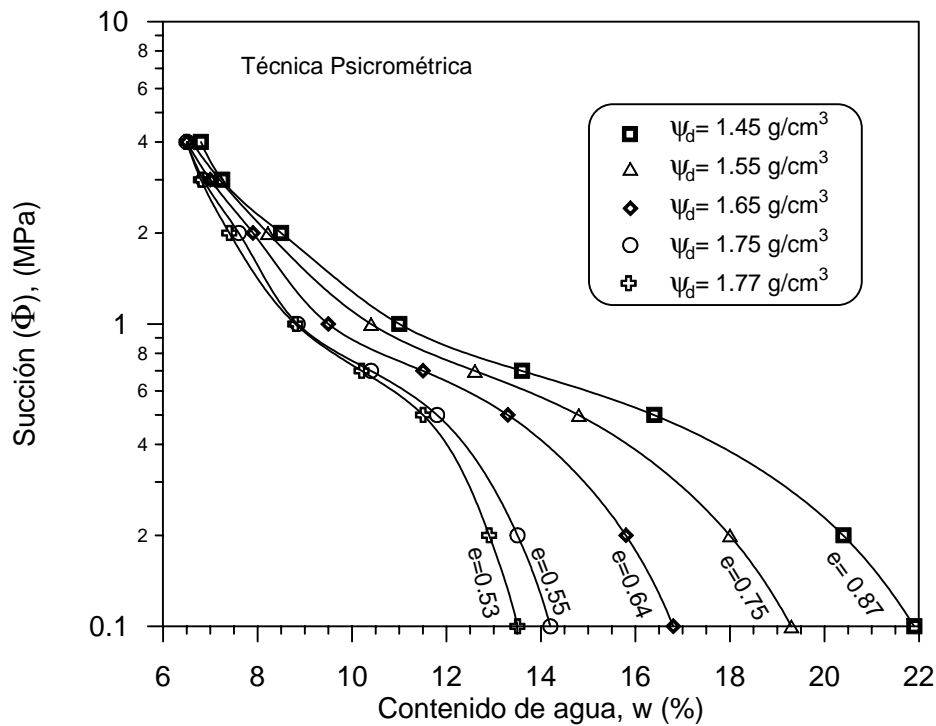


Figura 4.19 Relación entre la succión total (Φ), y contenido de agua (w) para diferentes densidades secas (ψ_d) a porosidad constante (técnica psicrométrica).

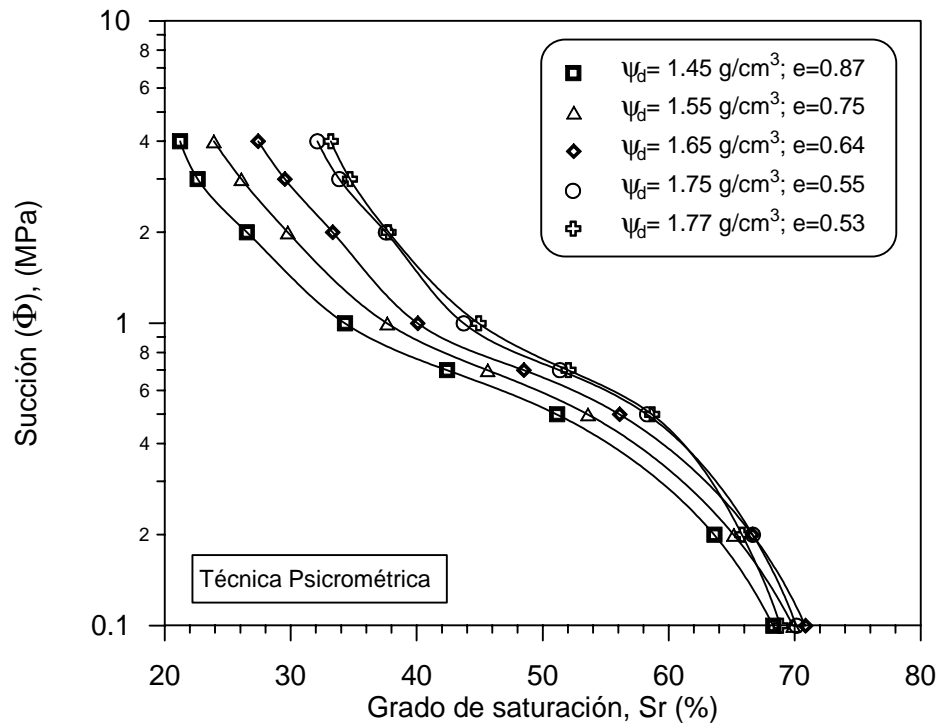


Figura 4.20 Curva de retención (succión & grado de saturación), a porosidad constante.

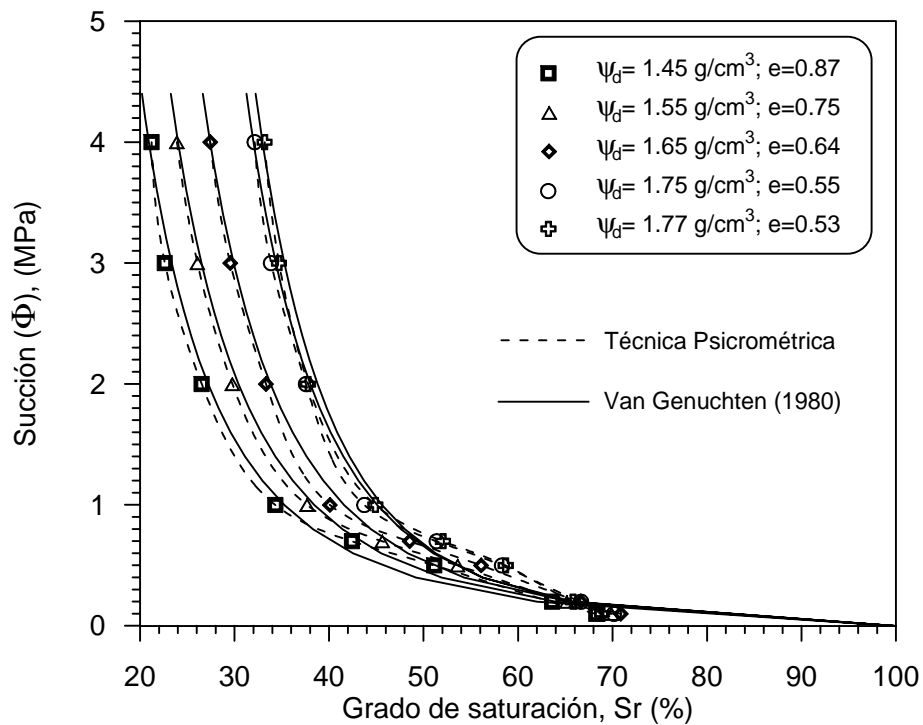


Figura 4.21 Comparación de la relación succión total – grado de saturación, obtenidas con la expresión de Van Genuchten y los datos experimentales (técnica psicrométrica).

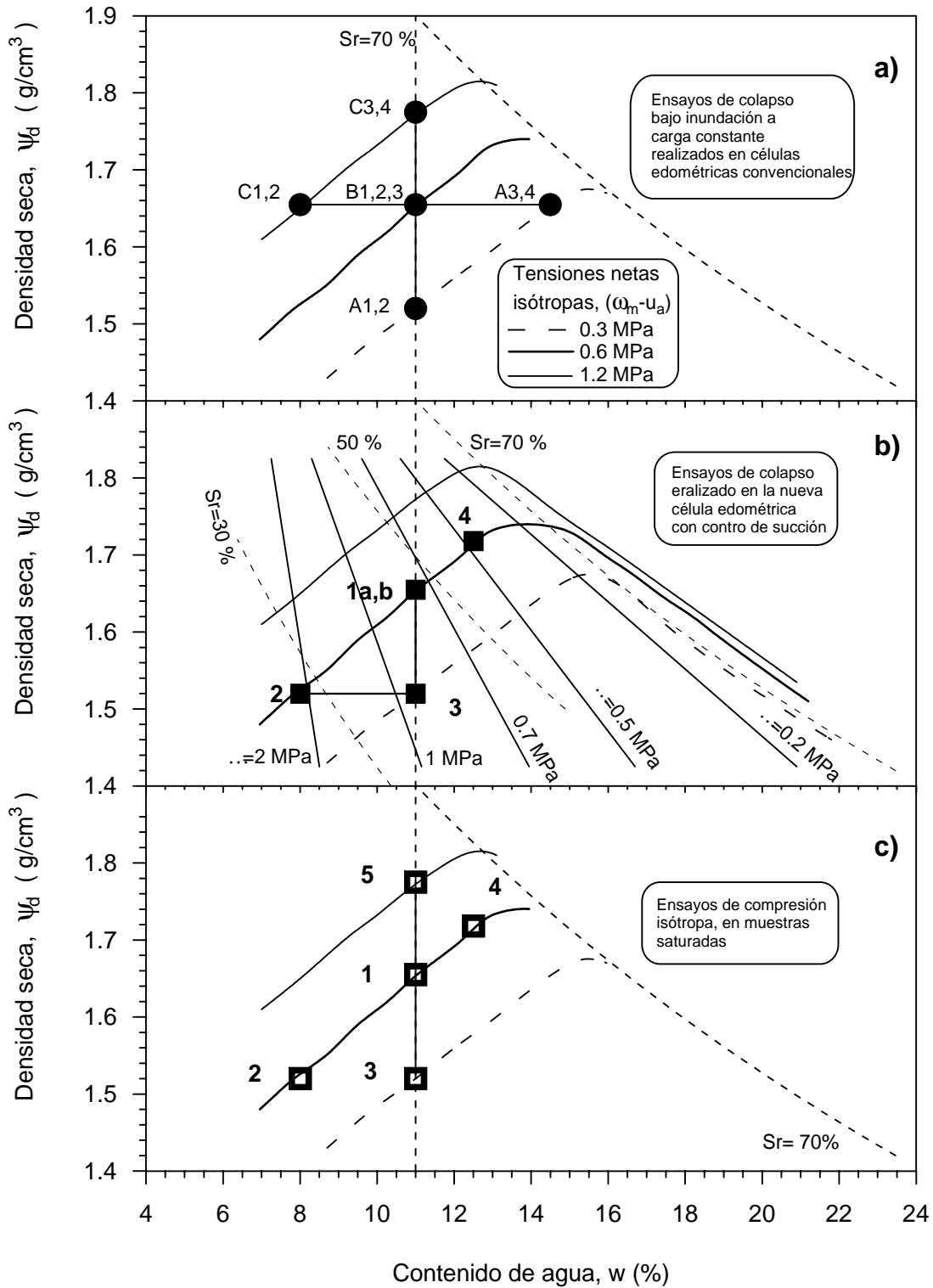


Figura 4.22 Condiciones iniciales: a) grupo de ensayos de colapso, bajo inundación a carga constante (edómetro convencional); b) ensayos de colapso con y sin control de la succión matricial (nueva célula edométrica con control de succión); c) ensayos de compresión isotrópica en muestras saturadas.

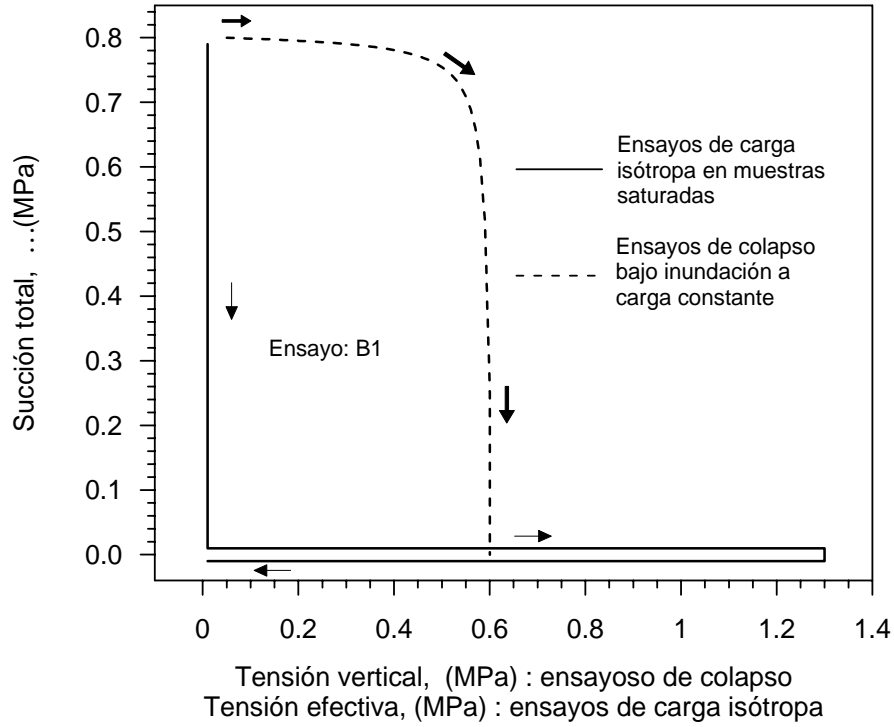


Figura 4.23 Trayectoria de esfuerzo y succión, en los ensayos de carga isotrópica y de colapso, bajo inundación a carga constante (ejemplo ensayo B1).

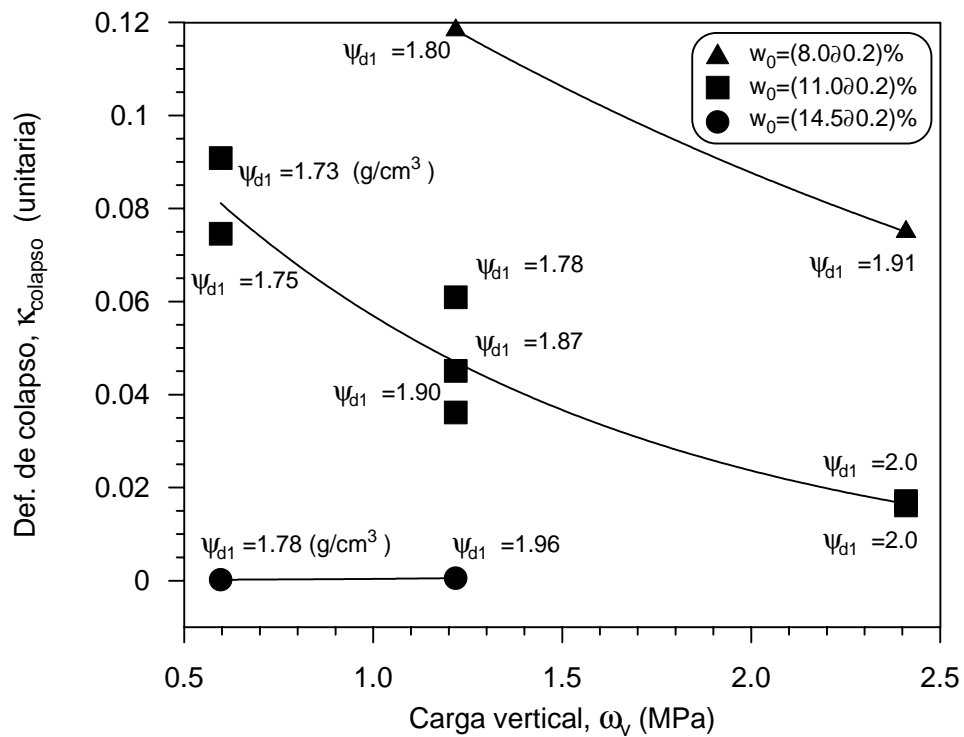


Figura 4.24 Deformación de colapso para diferentes valores de carga vertical aplicada.

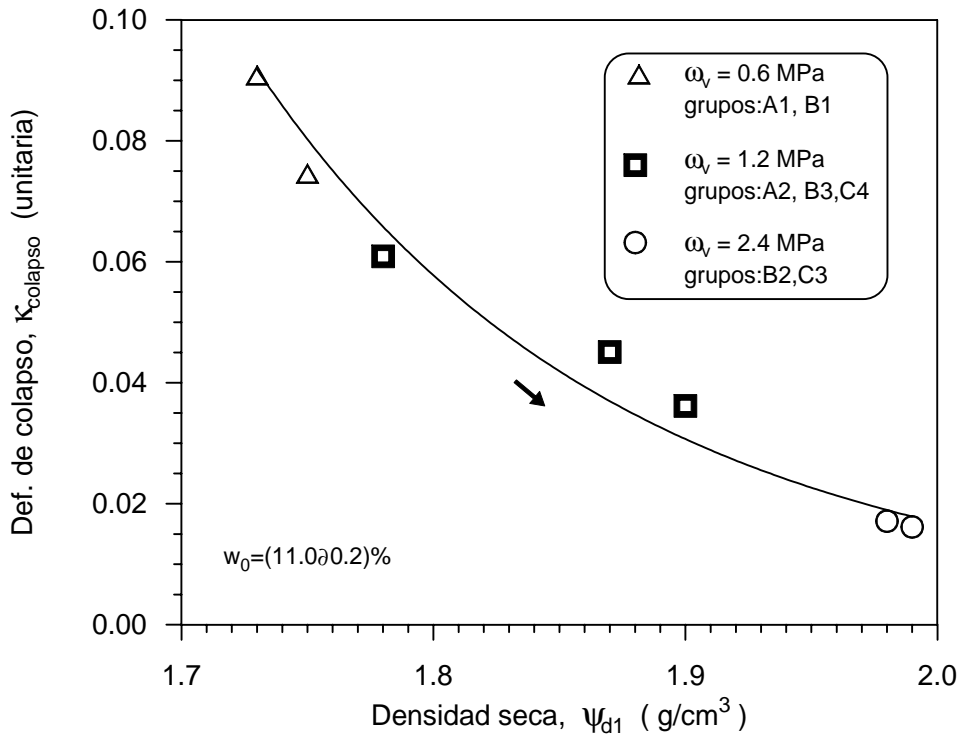


Figura 4.25 Colapso en función de la densidad seca en el momento de la inundación para muestras con la misma humedad inicial (11%).

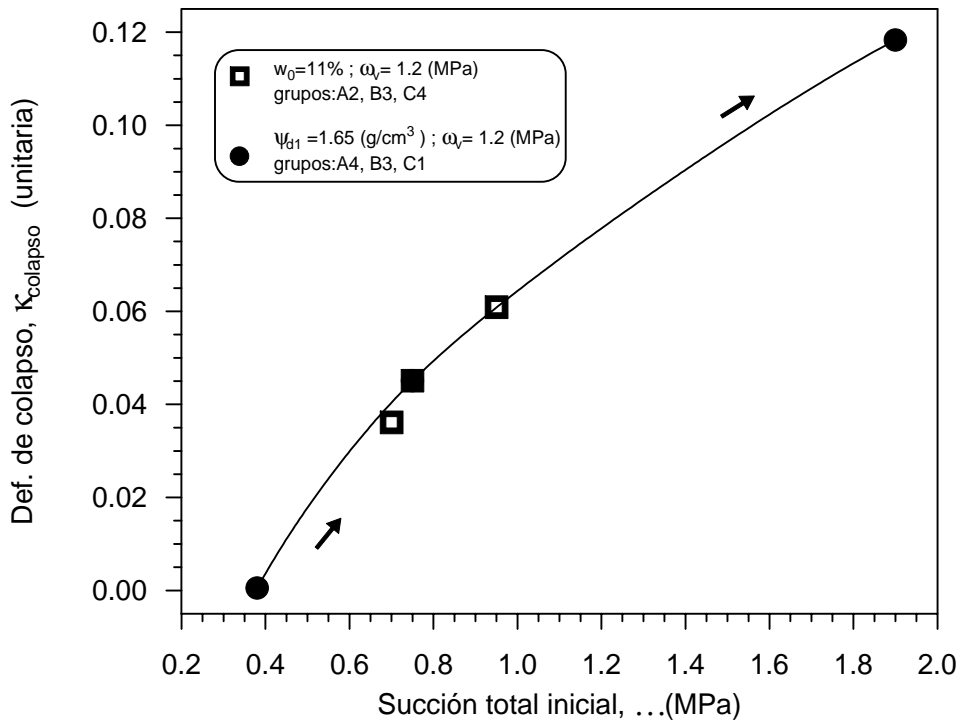


Figura 4.26 Influencia de la succión inicial total (..) en la deformación de colapso.

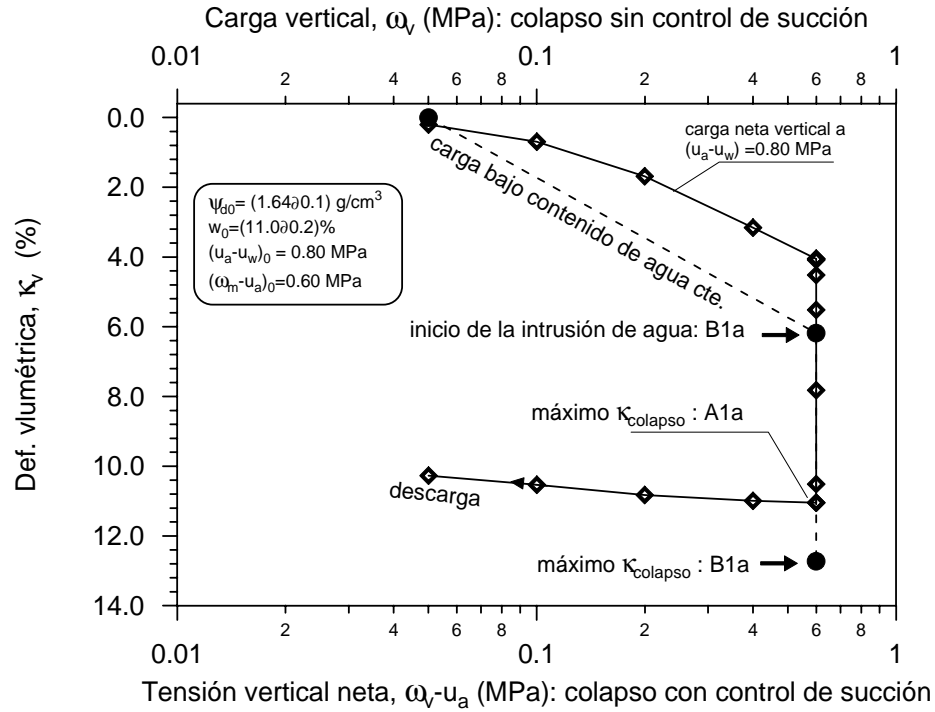


Figura 4.27 Variación de la deformación volumétrica en las trayectorias de carga, saturación y descarga, para los ensayos A1a y B1a.

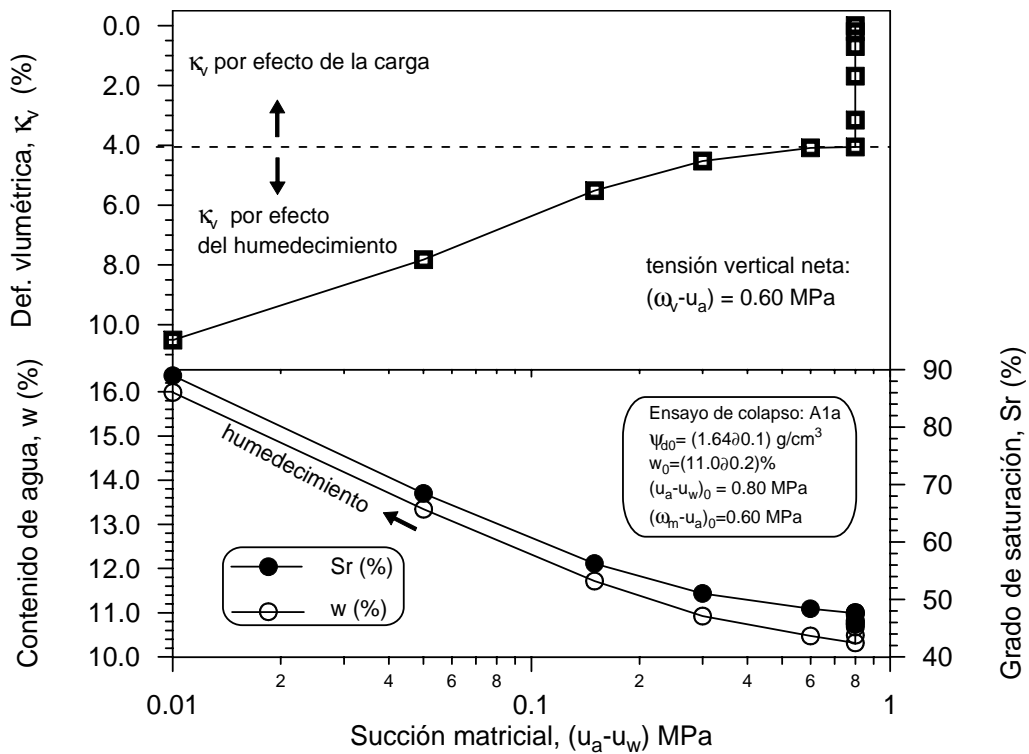


Figura 4.28 Variación de la deformación volumétrica, contenidos de agua y grados de saturación, bajo esfuerzo vertical neto constante.

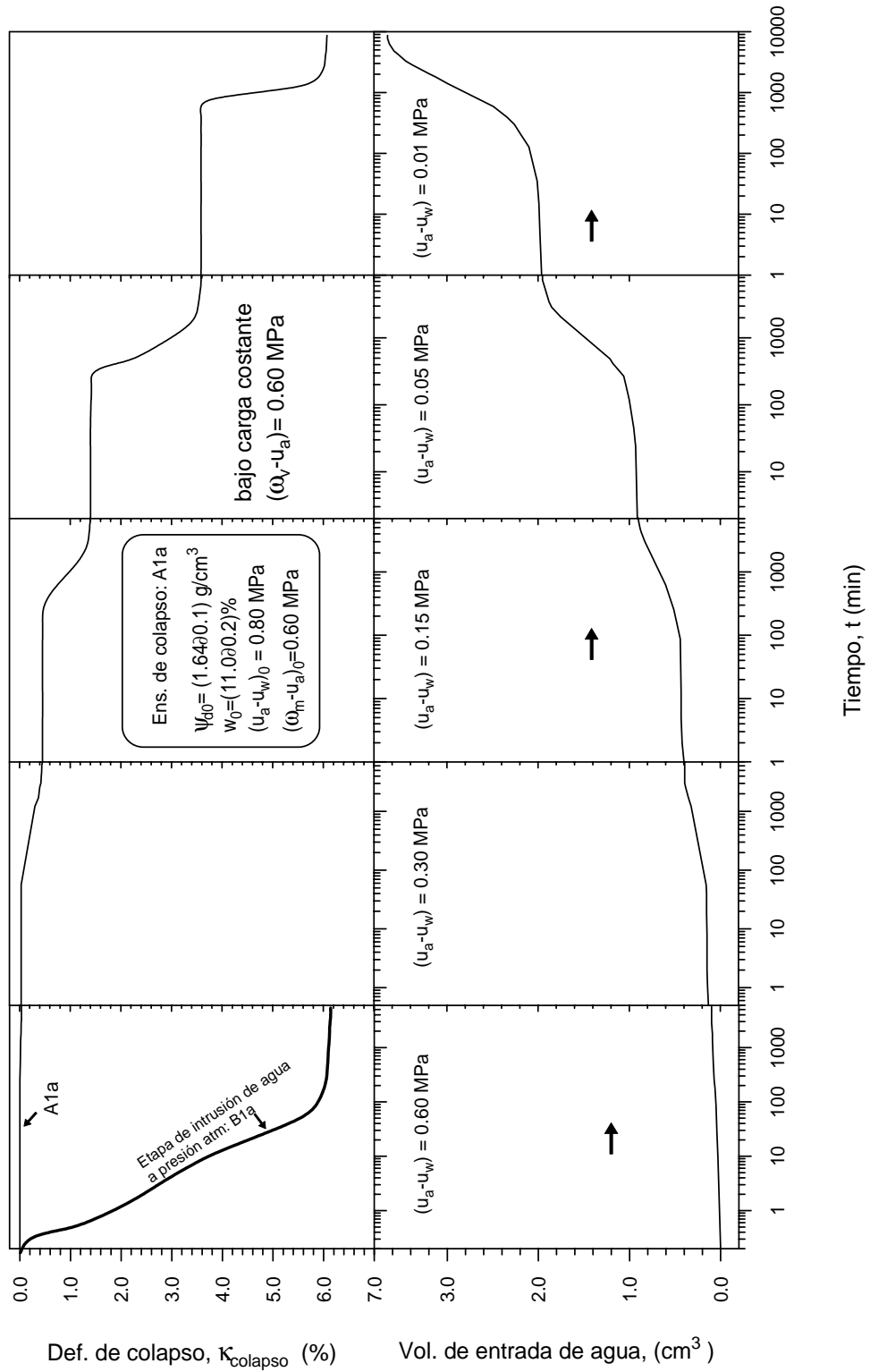


Figura 4.29 Evolución en el tiempo de la deformación de colapso, volumen de entrada de agua para el ensayo (A1a) en el proceso de humedecimiento. Deformación de colapso en la etapa de intrusión de agua a presión atm, para el ensayo B1a.

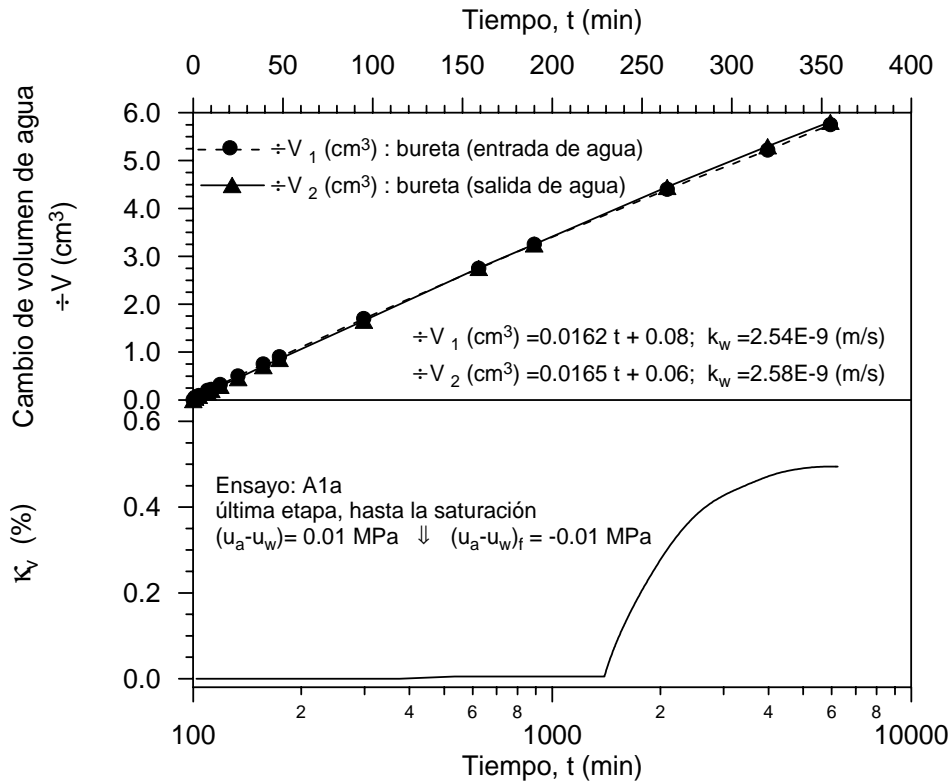


Figura 4.30 Relación entre volumen de agua-tiempo, para obtener la permeabilidad de la muestra y ratificar el 100 % de saturación de la misma.

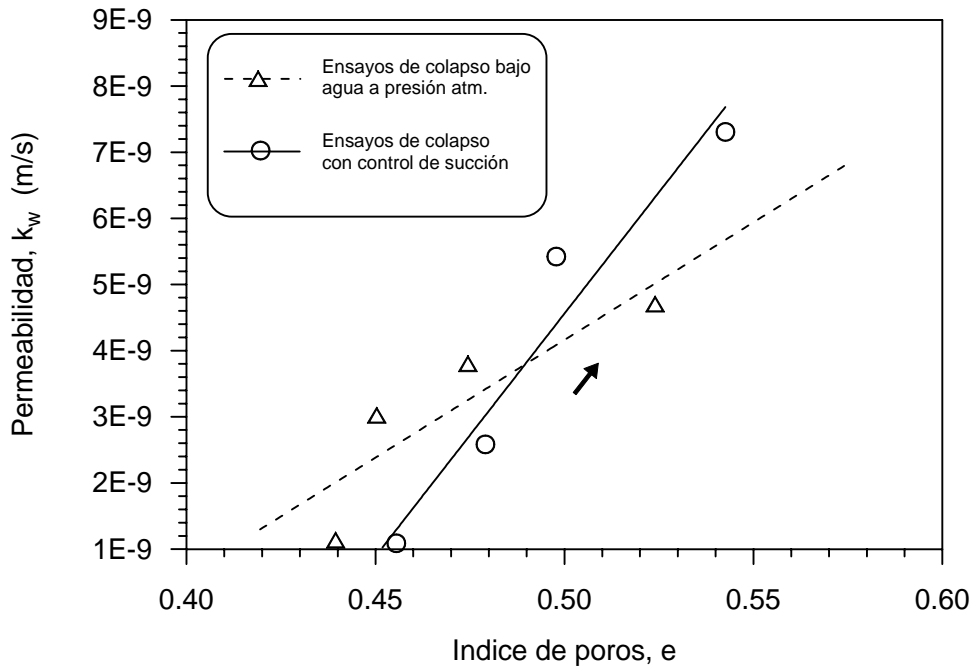


Figura 4.31 Relación porosidad-permeabilidad al agua. Ensayos de colapso.

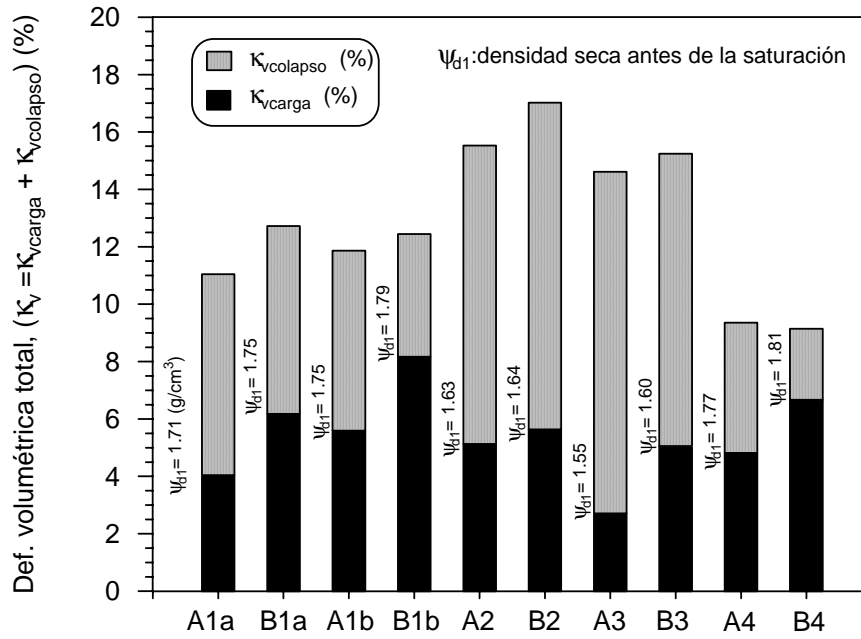


Figura 4.32 Comparación de la deformación volumétrica total entre los ensayos del grupo A (a succión controlada), y los ensayos del grupo B (intrusión de agua a presión atm).

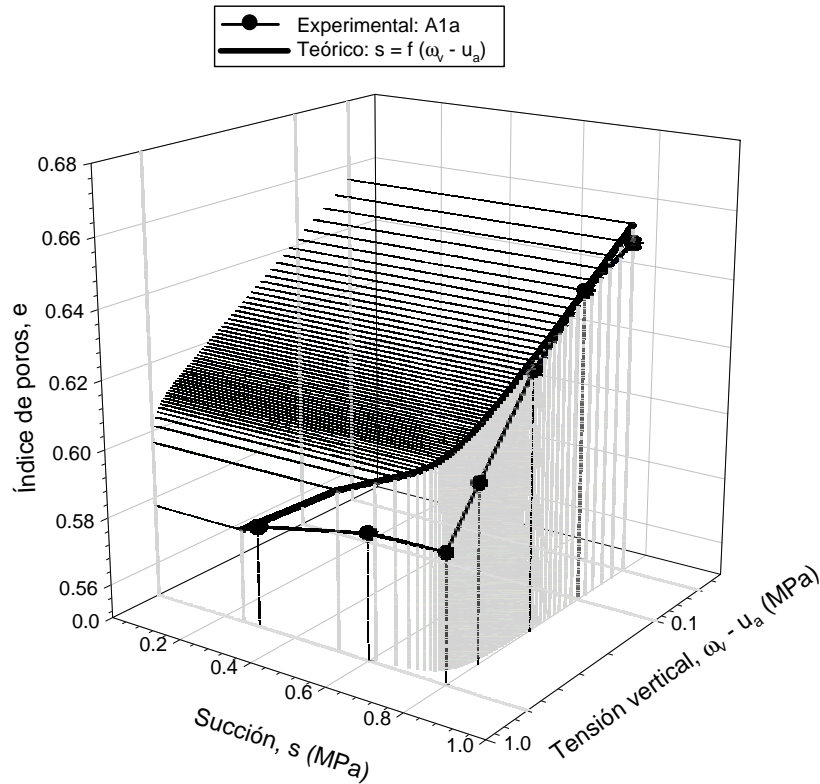


Figura 4.33 Simulación de la evolución de la trayectoria de carga en los ensayos de colapso sin control de succión (grupo B).

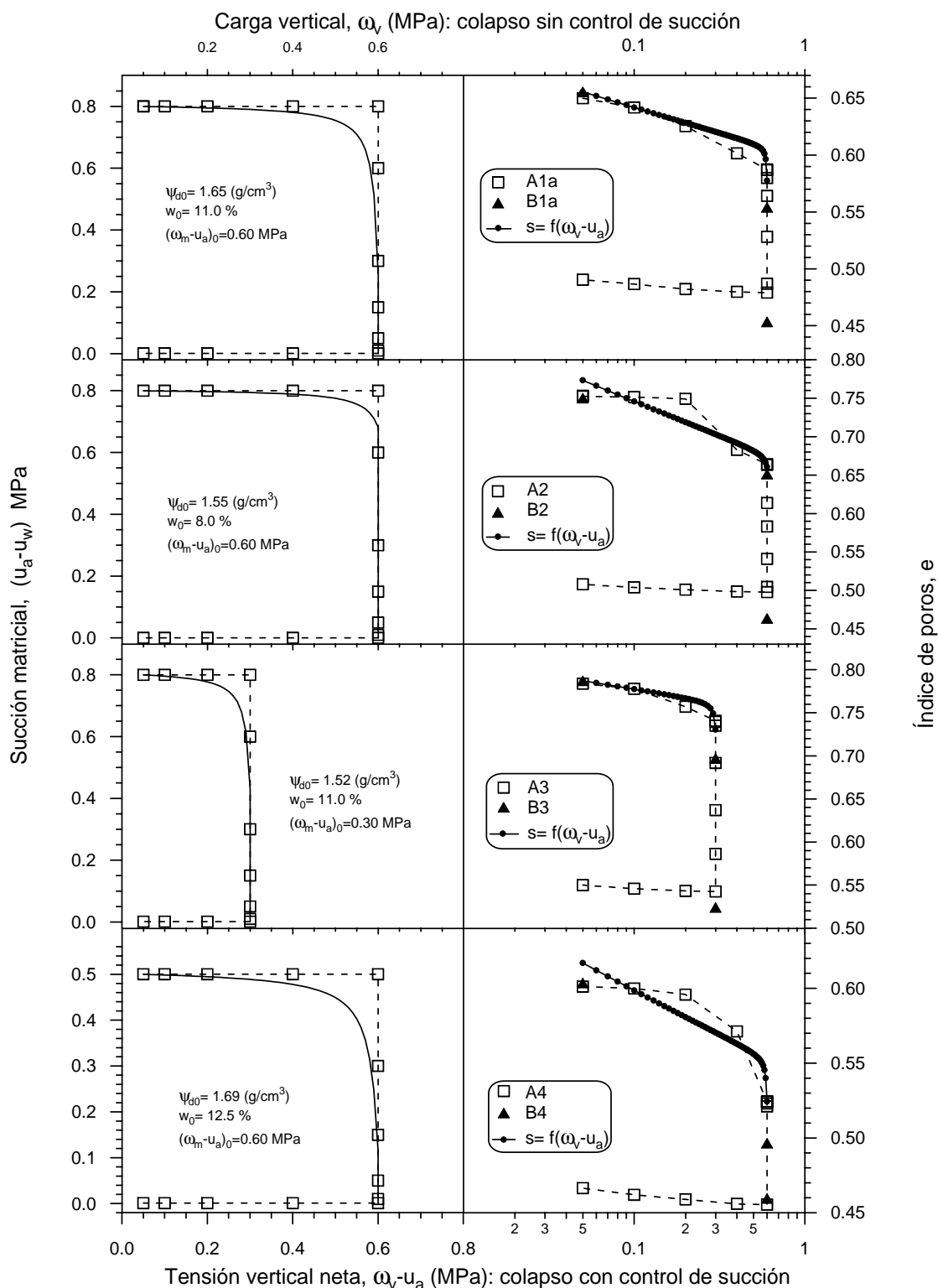


Figura 4.34 Relación entre el índice de poro-esfuerzo vertical neto, succión-esfuerzo vertical neto de los ensayos de colapso del grupo A (a succión controlada), y del grupo B (simulación de la evolución de la succión en los ensayos sin control de succión).

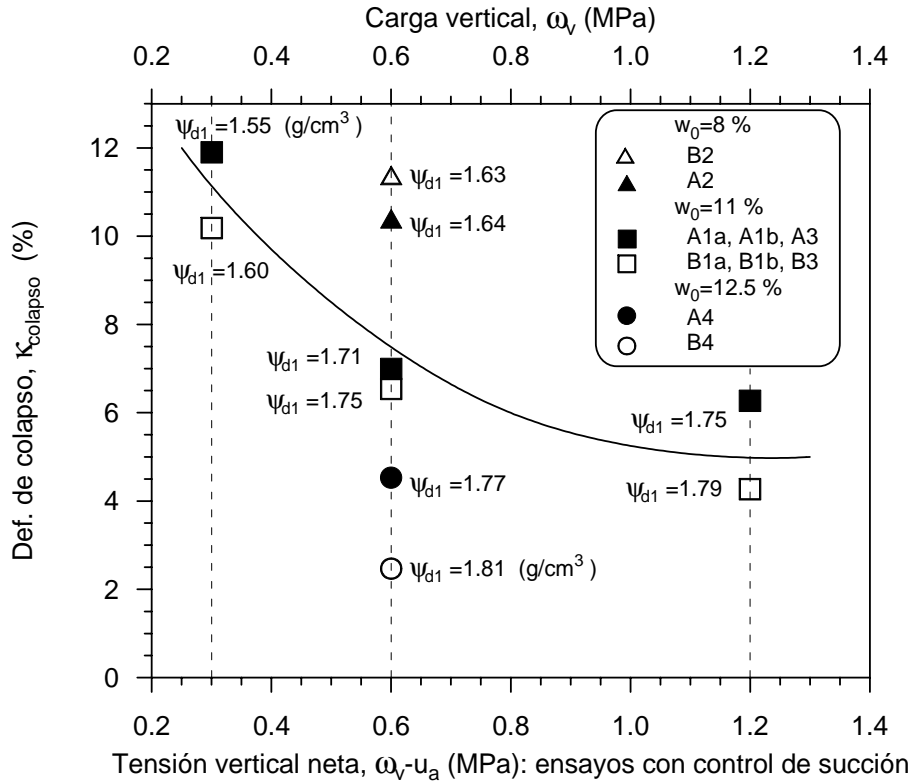


Figura 4.35 Deformación de colapso para diferentes valores de densidad seca.

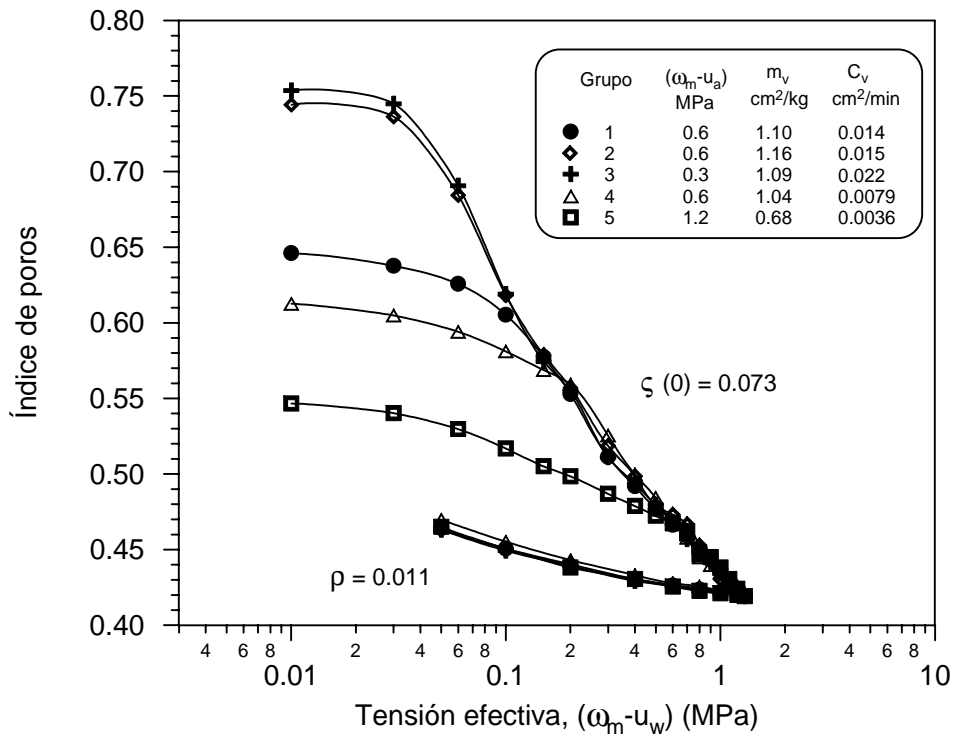


Figura 4.36 Ensayos de compresión isotrópica drenados en muestras saturadas.

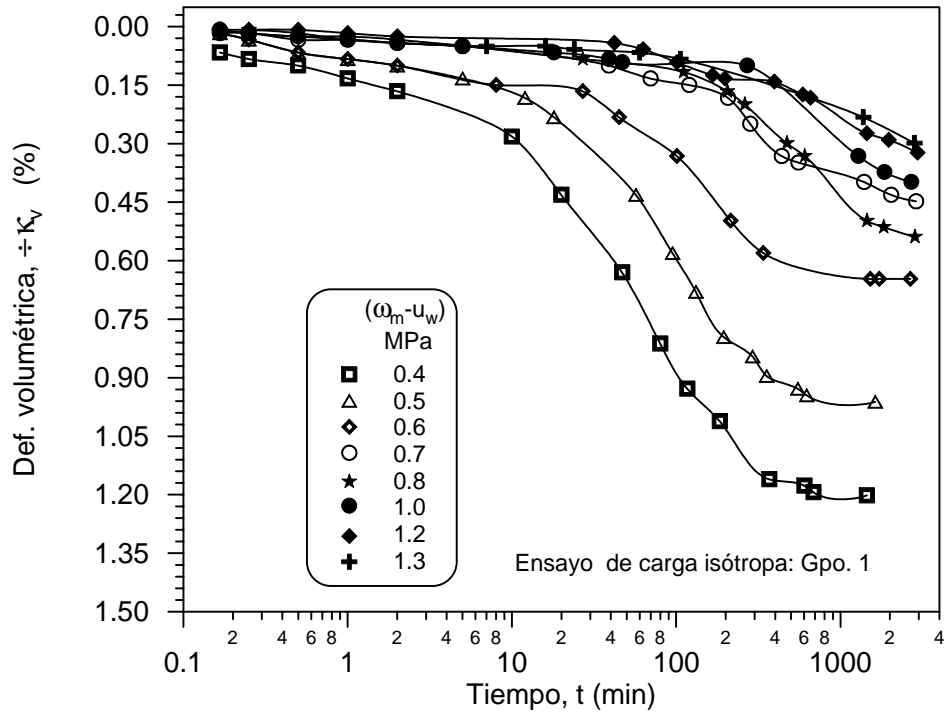


Figura 4.37 Deformación temporal de la muestra para diferentes incrementos del esfuerzo efectivo.

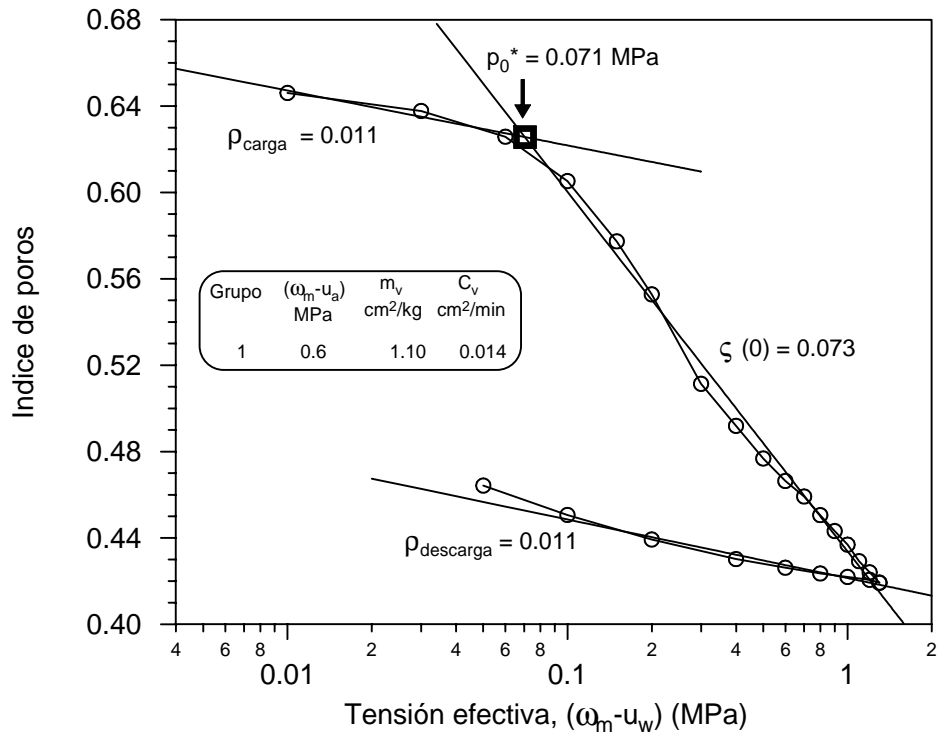


Figura 4.38 Obtención de la presión de preconsolidación en muestras saturadas p_0^* (ensayo de compresión isotrópica).

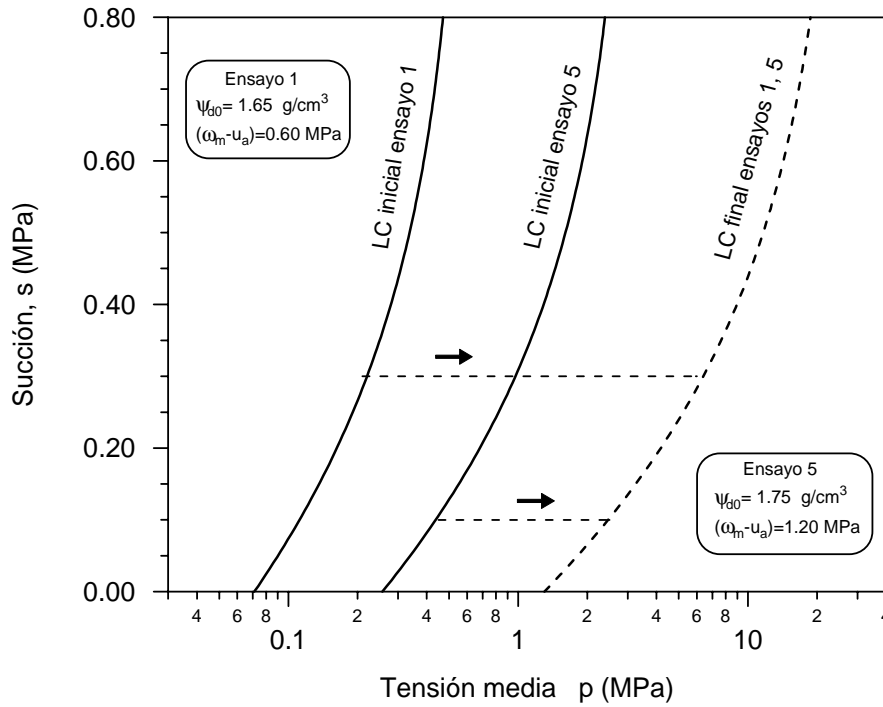


Figura 4.39a Superficies de fluencia en los ensayos de compresión isotrópica en muestras saturadas de los ensayos 1 y 5.

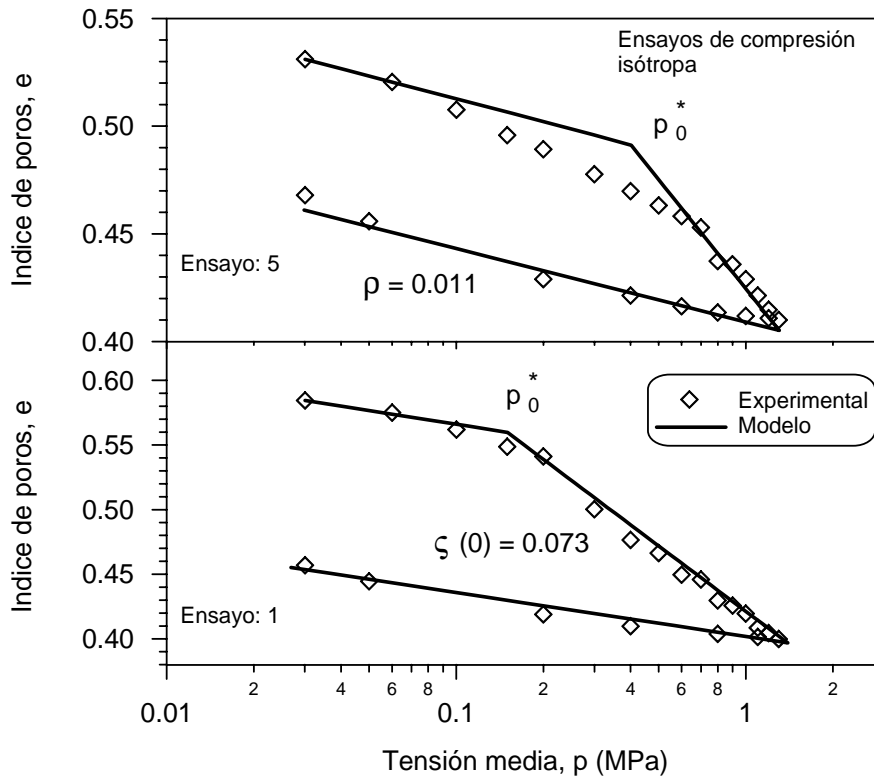


Figura 4.39b Reproducción mediante un modelo numérico de los ensayos de compresión isotrópica 1 y 5.

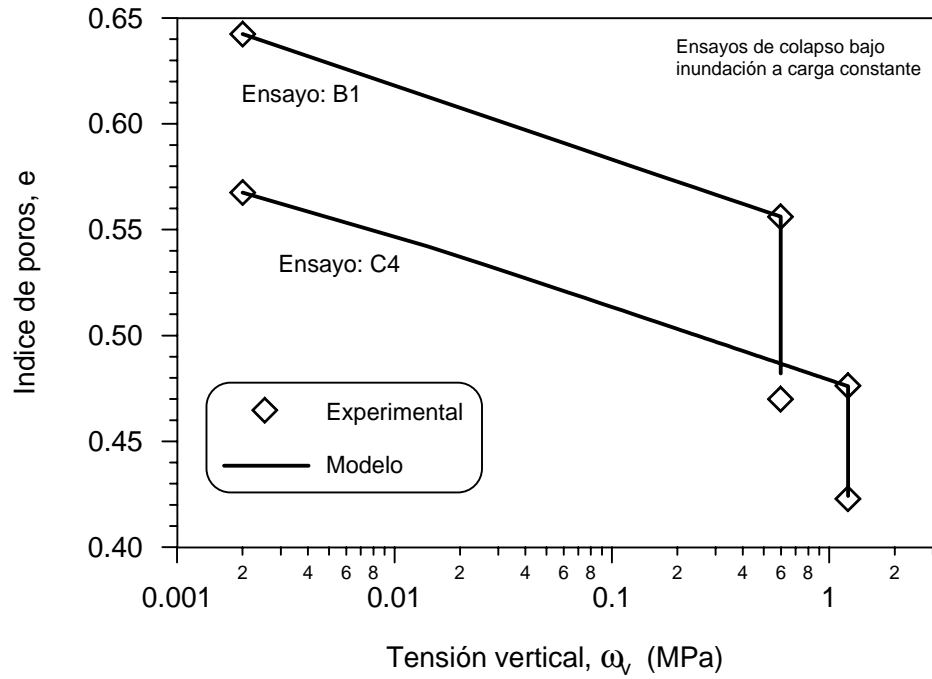


Figura 4.39c Curva experimental & la curva predicha de los ensayos de colapso, bajo inundación a carga constante. Ensayos B1 y C4.

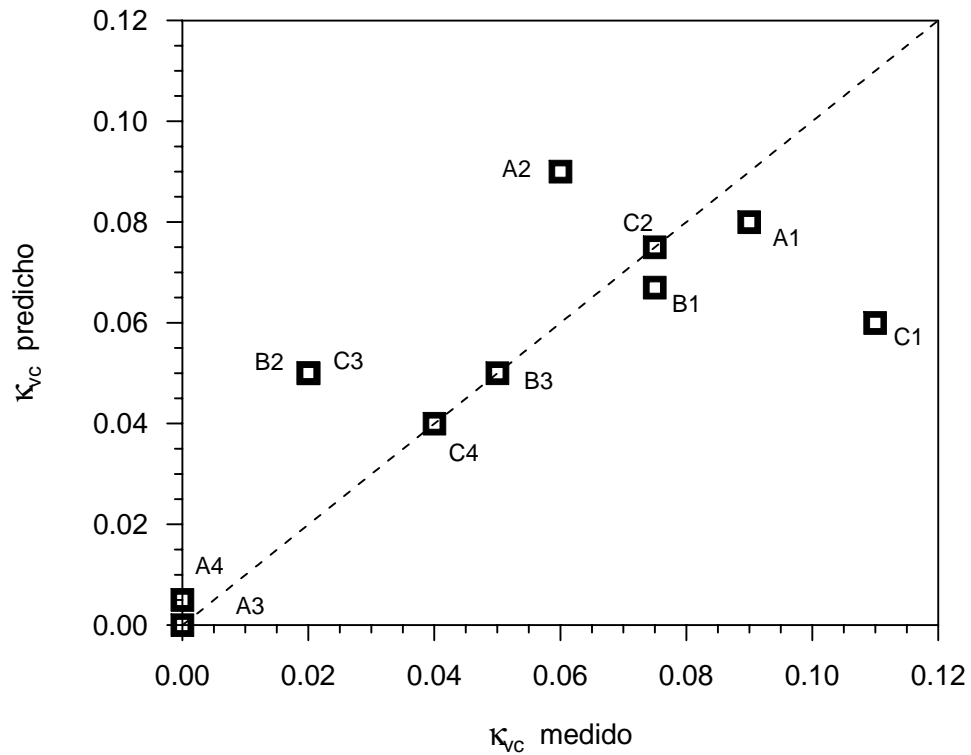


Figura 4.39d Deformación de colapso, medida y predicha.

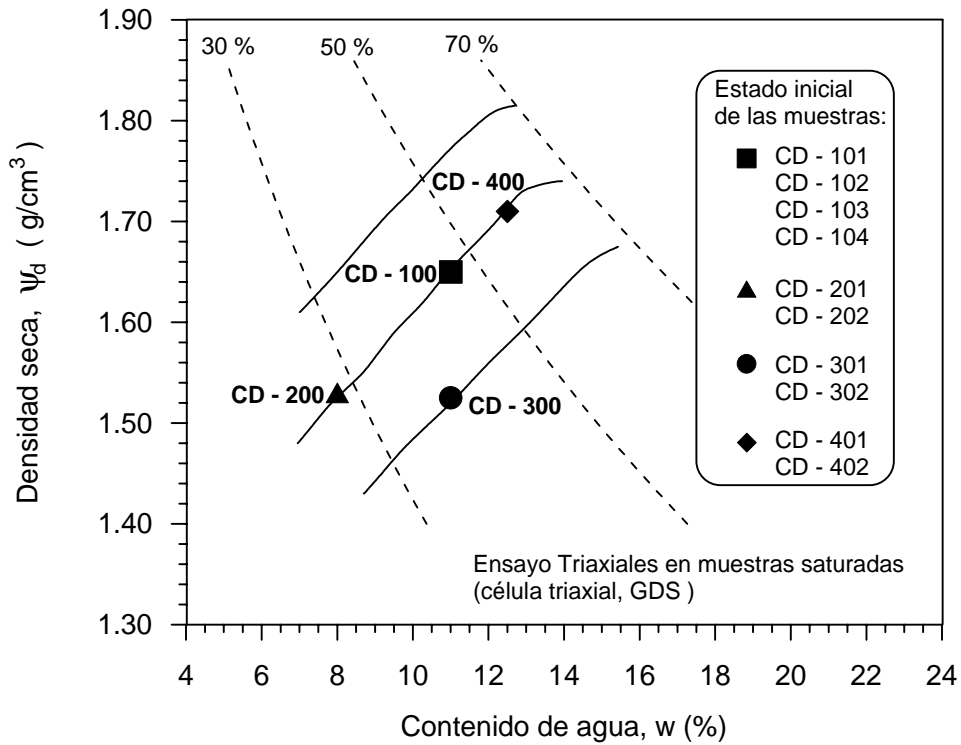


Figura 4.40 Condiciones iniciales de las muestra. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (CD) realizados en la célula triaxial GDS, Instrument Ltd.

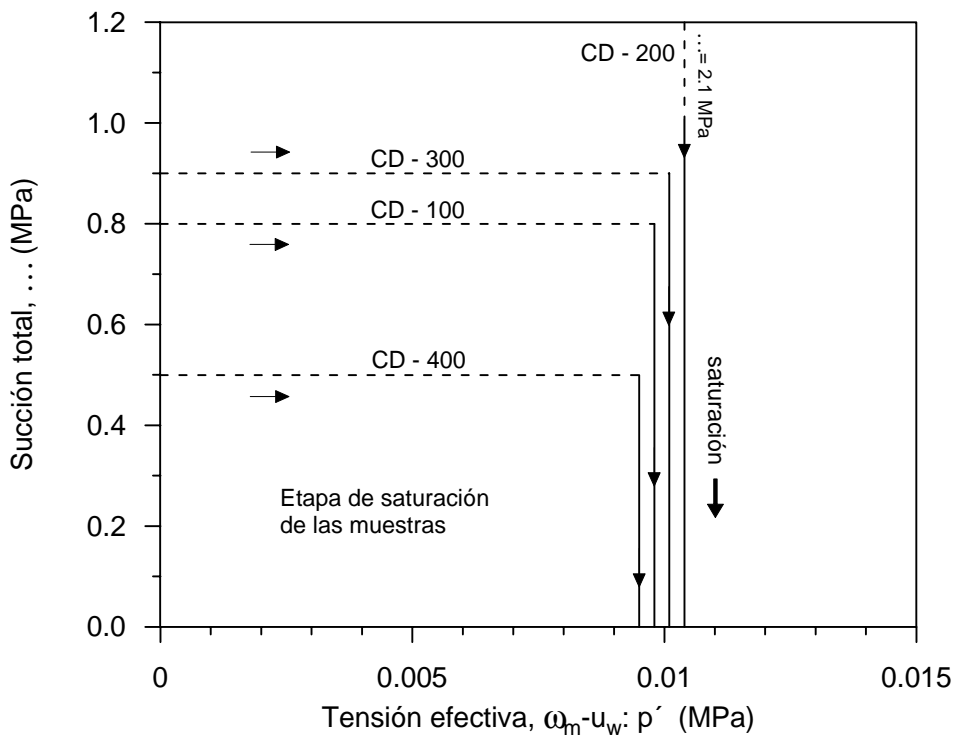


Figura 4.41 Trayectoria de esfuerzo realizado para alcanzar el estado saturado de las muestras de los ensayos triaxiales (GDS, Intrument Ltd.).

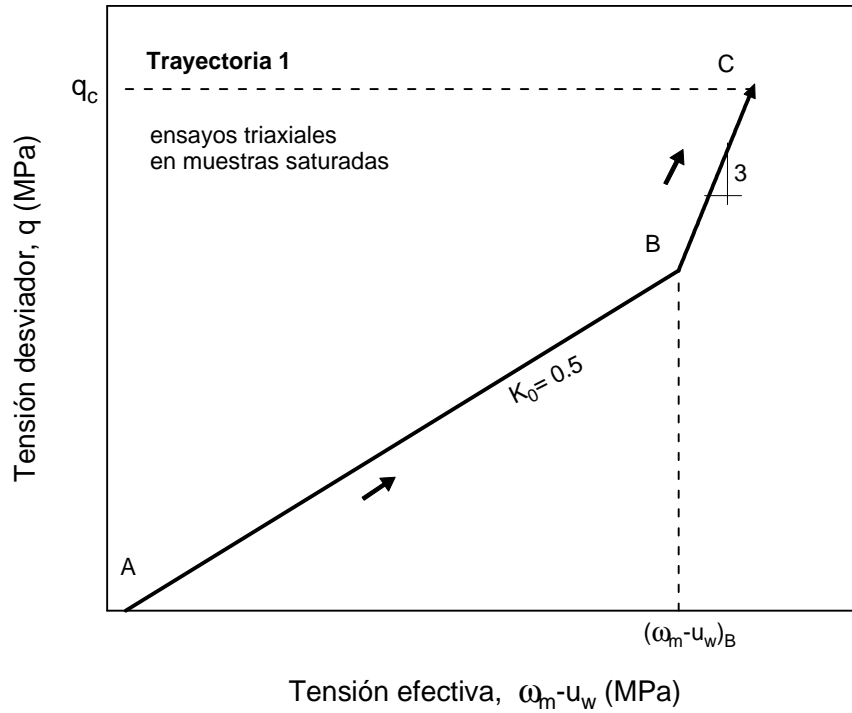


Figura 4.42 Trayectoria de esfuerzo 1. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (GDS).

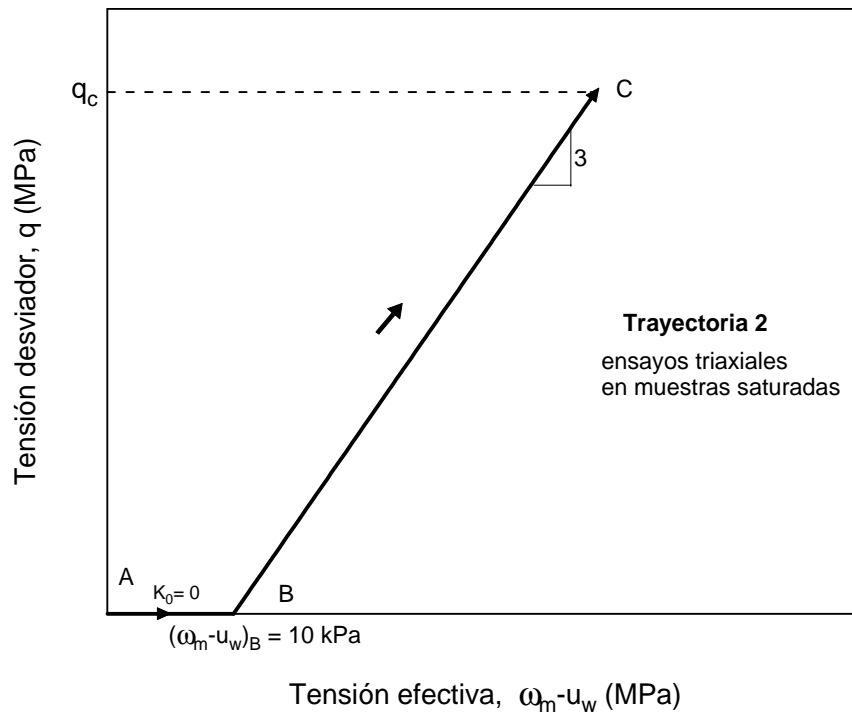


Figura 4.43 Trayectoria de esfuerzo 2. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (GDS).

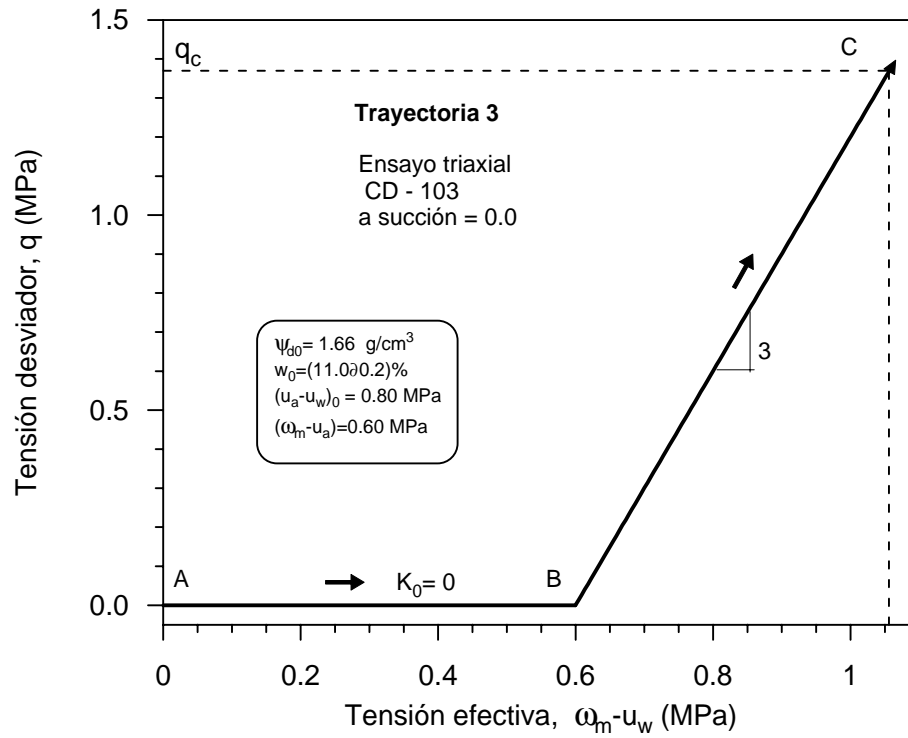


Figura 4.44 Trayectoria de esfuerzo 3 del ensayo triaxial CD-103.

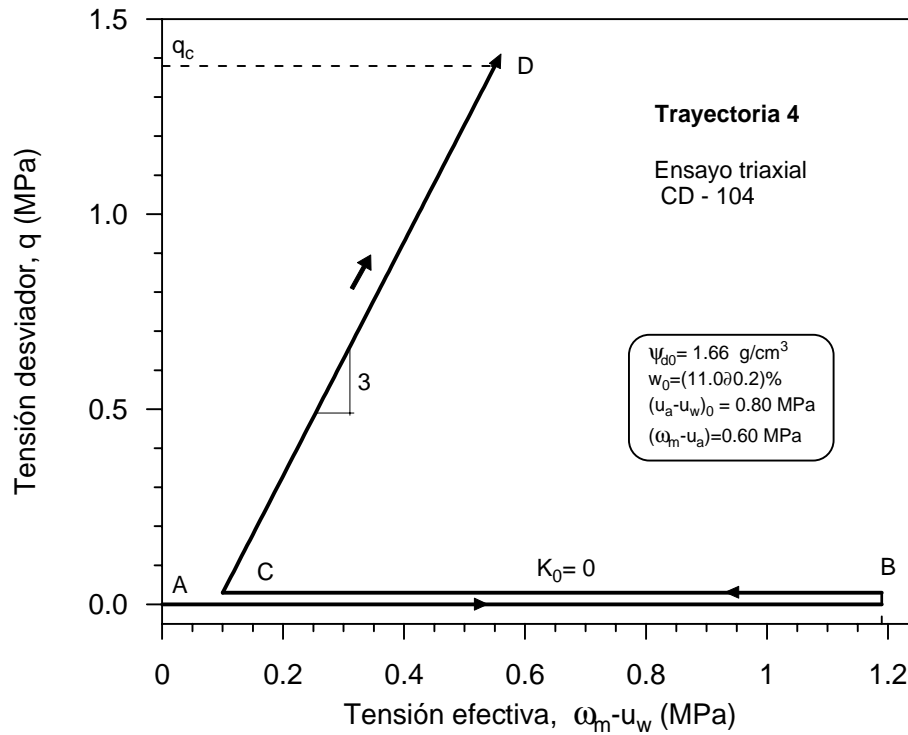


Figura 4.45 Trayectoria de esfuerzo 4 del ensayo triaxial CD-104.

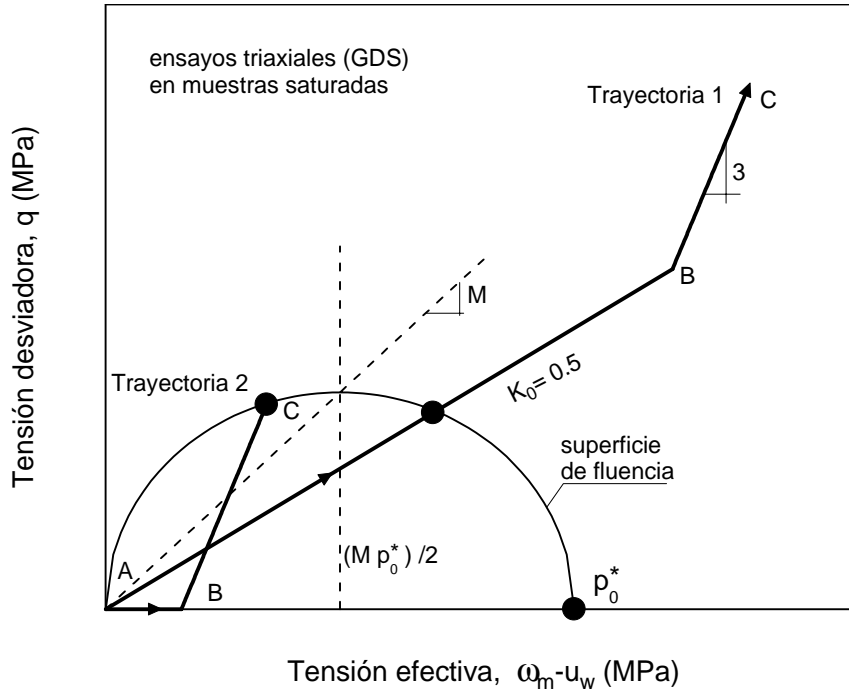


Figura 4.46 Obtención de puntos de la superficie de fluencia con la ejecución de las trayectorias tensionales 1 y 2. Célula triaxial estándar GDS.

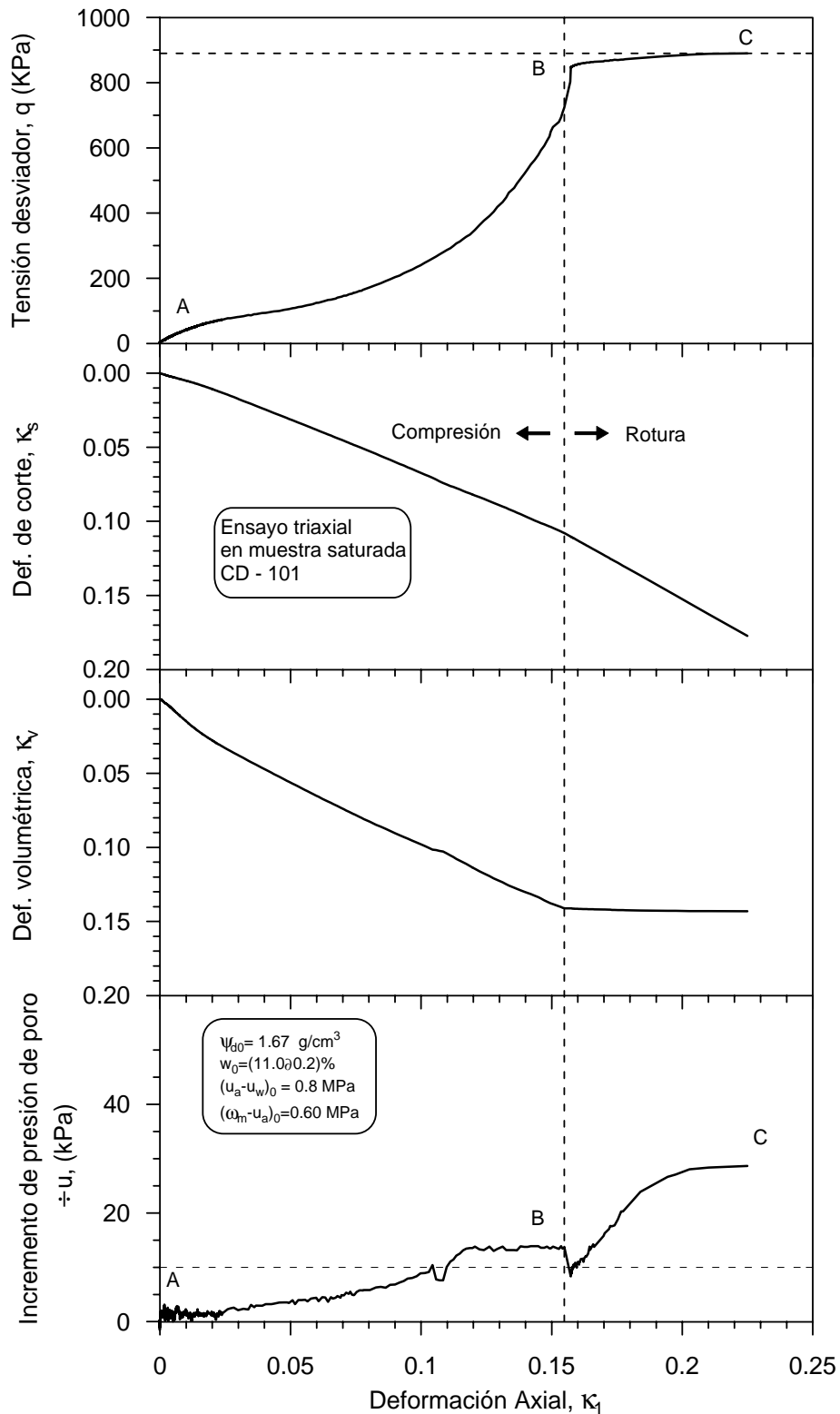


Figura 4.47 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-101).

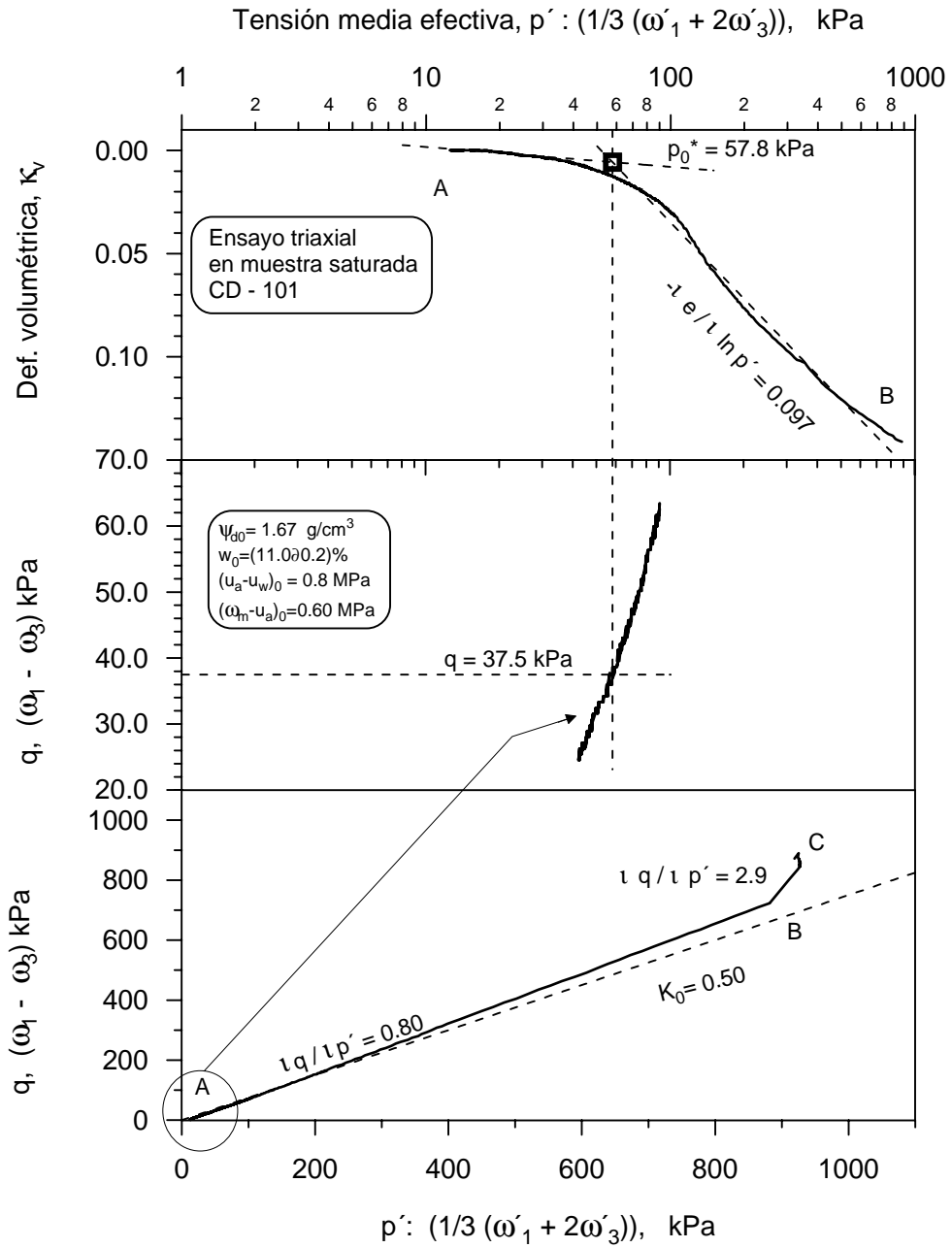


Figura 4.48 Esfuerzo medio efectivo: deformación y esfuerzo desviador en la etapa de rotura (CD-101). Obtención de las coordenadas del punto de la superficie de fluencia (p_0^* , q).

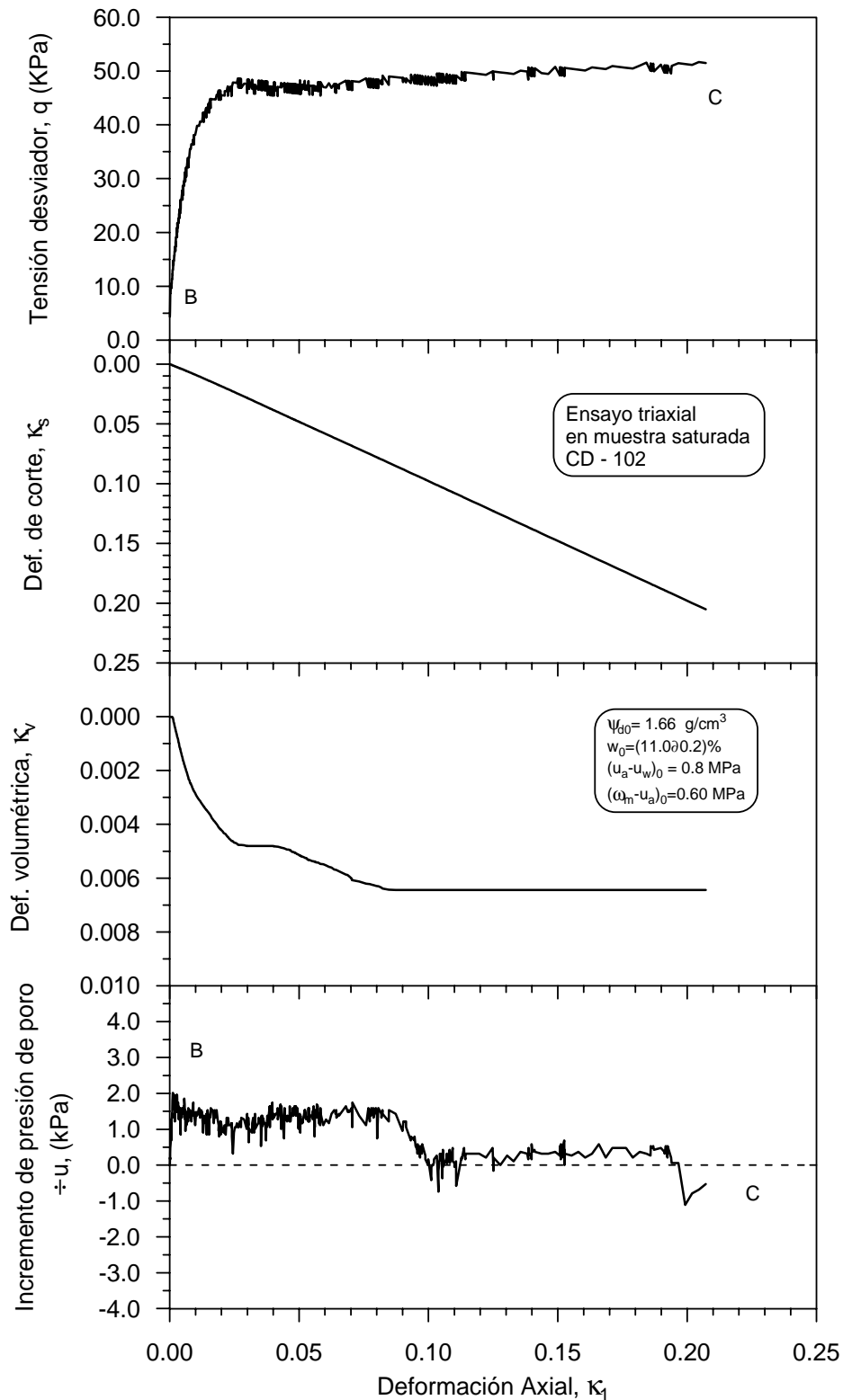


Figura 4.49 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\div u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-102).

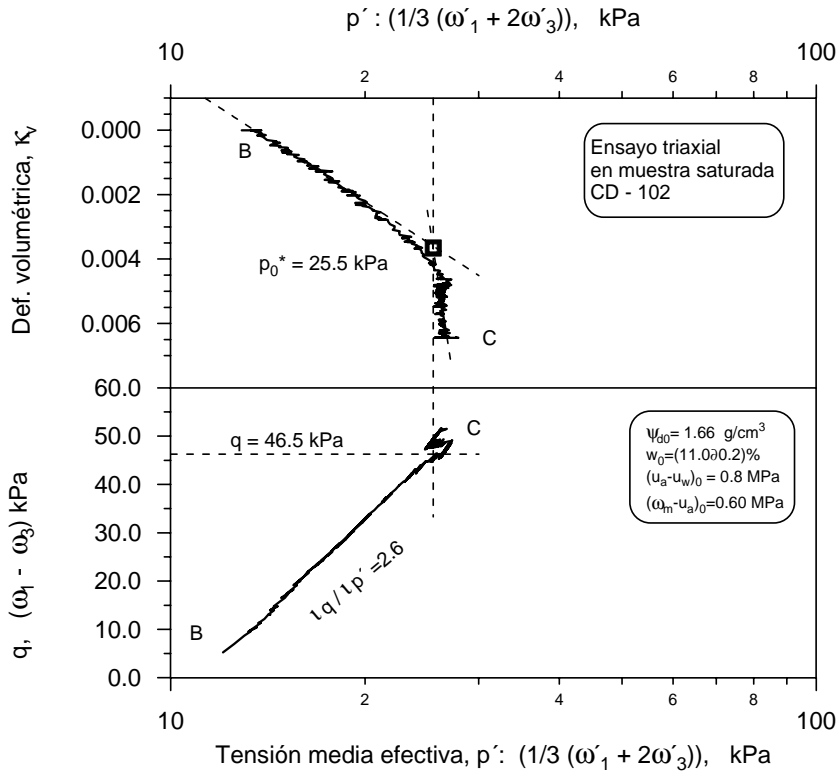


Figura 4.50 Esfuerzo medio efectivo: deformación y esfuerzo desviador en la etapa de rotura (CD-102). Obtención de las coordenadas del punto de la superficie de fluencia (p_0^* , q).

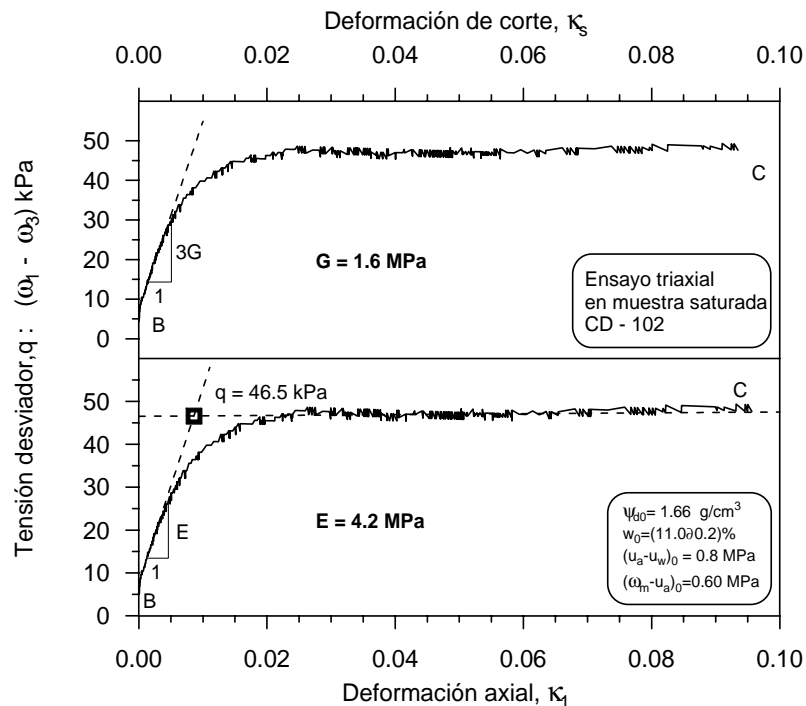


Figura 4.51 Esfuerzo medio efectivo & deformación axial y de corte (CD-102). Determinación de los módulos elásticos, y la ordenada de un punto de la superficie de fluencia (q).

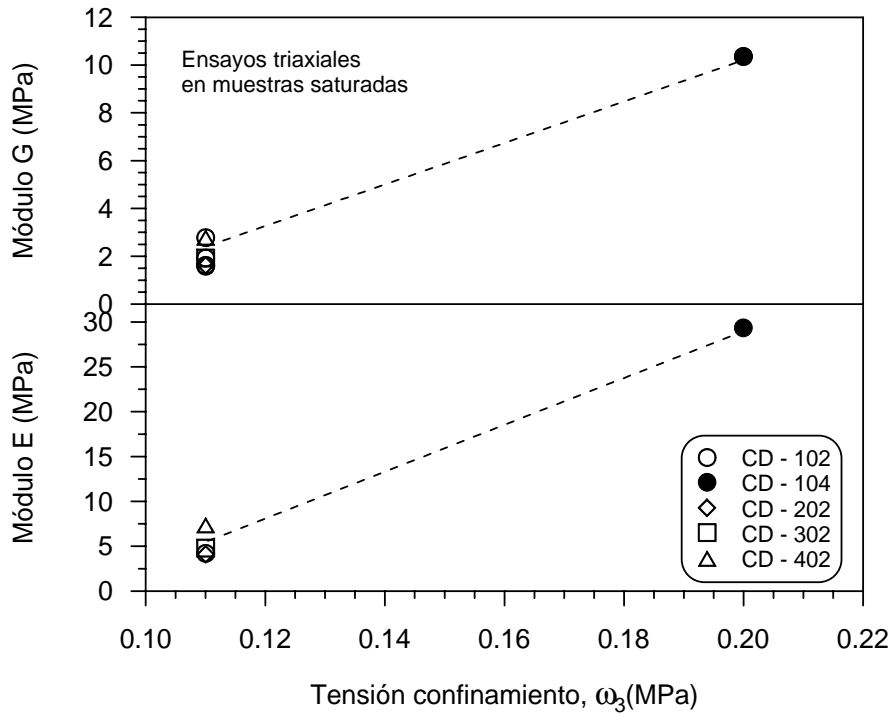


Figura 4.52 Variación de los módulos elásticos con respecto a la presión de confinamiento (ω_3).

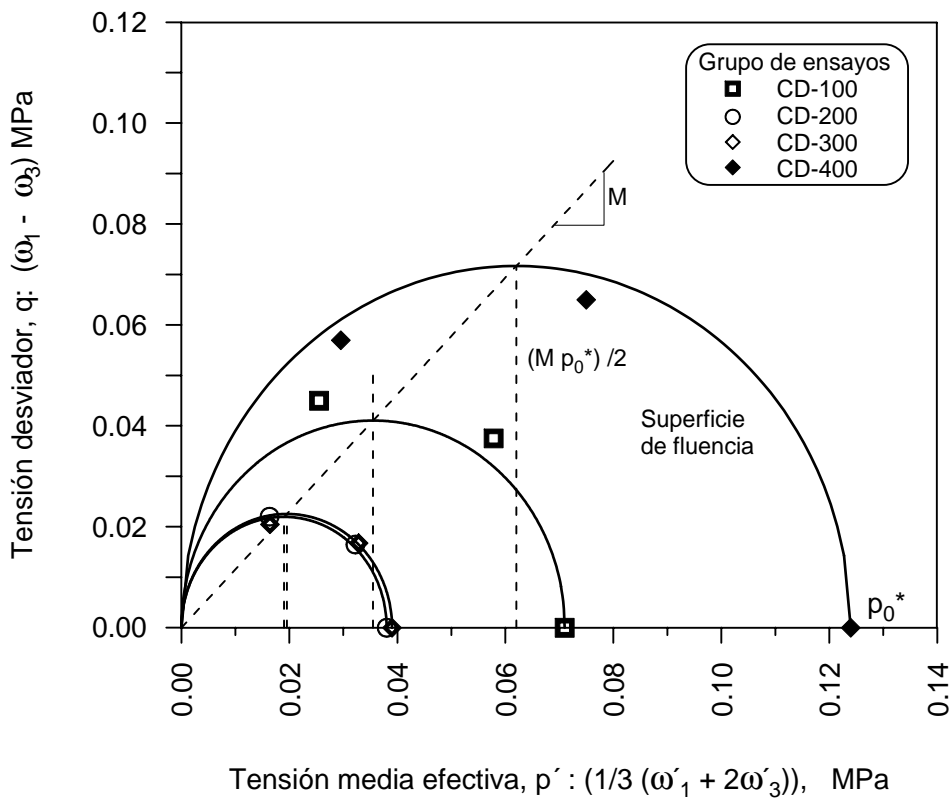


Figura 4.53 Superficie de fluencia simétrica / elíptica en el plano $p' : q$ (modelo Cam-Clay).

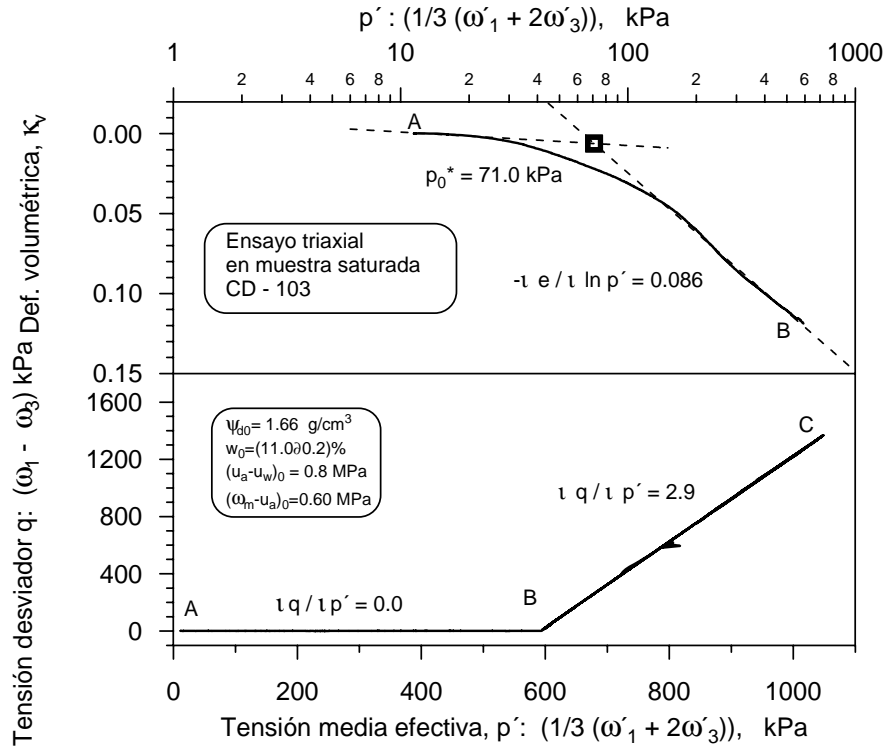


Figura 4.54 Obtención del esfuerzo de preconsolidación (p_0^*) del ensayo CD-103.

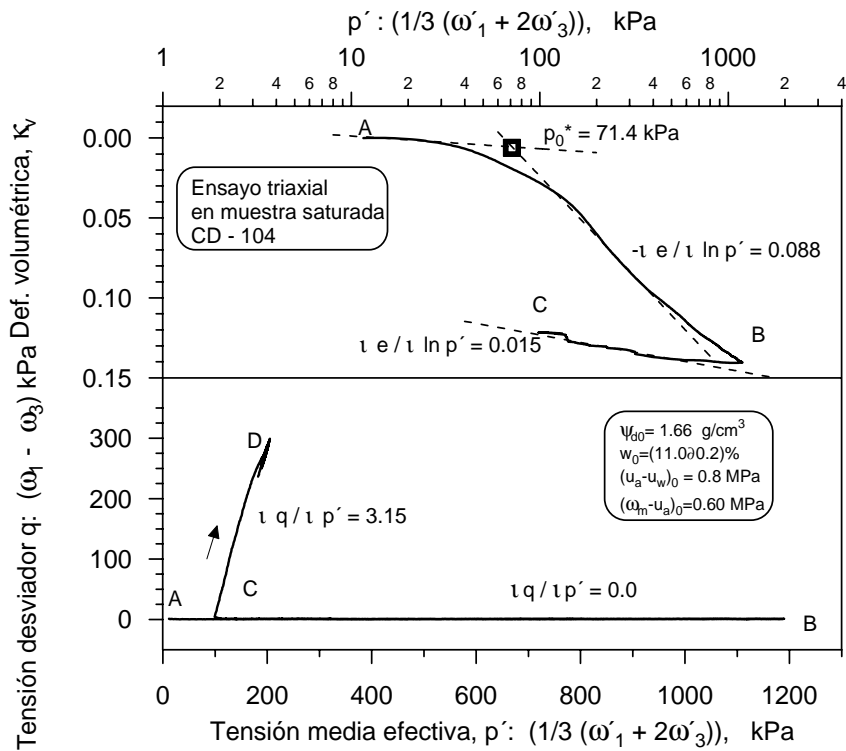


Figura 4.55 Obtención de los parámetros del suelo; esfuerzo de preconsolidación (p_0^*) y parámetros de compresibilidad ($\zeta(0)$, p_0) del ensayo CD-104.

CAPÍTULO 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS

5.1 Introducción

Los programas de ensayos se diseñaron teniendo en cuenta los objetivos perseguidos en esta investigación y los equipos disponibles. El objetivo fundamental planteado para la realización de estos ensayos ha sido reproducir repuestas características del suelo en estado no saturado, cuando se somete a cambios de succión y trayectorias de esfuerzos de forma tal que se obtenga información para modelar su comportamiento. El programa de ensayos de laboratorio previsto incluye en consecuencia, diferentes trayectorias de esfuerzos a seguir para poner de manifiesto distintos aspectos (en especial los básicos) de los modelos constitutivos. Se han realizado tres tipos de ensayos con succión controlada:

- a) Ensayos edométricos
- b) Ensayos de compresión isótropa
- c) Ensayos de compresión triaxial

Los ensayos de compresión isótropa se han realizado en una mini-célula rígida, pensada sólo para ensayos con carga isótropa y en el equipo triaxial con succión controlada.

Para los ensayos se utilizó una arcilla de baja plasticidad (CL) de Barcelona, ya empleada en otros trabajos (Gens, *et al*, 1995; Suriol, *et al*, 1998). En el Capítulo 4 se describe con detalle la caracterización de dicho suelo.

Las probetas fabricadas para los ensayos realizados, se prepararon de acuerdo con el procedimiento de compactación estática en condiciones isótropas (esfuerzo controlado), descrito en la sección 4.3.1. La técnica de fabricación de las probetas, en todas las series de los diferentes programas de ensayos, se describió en la sección 4.3.2 del Capítulo 4, de igual manera, lo referente a los equipos para la realización de esta investigación, se recoge en el Capítulo 3.

En los Anexos (A, B y C), se describe con detalle el procedimiento de montaje de la probeta, y de la puesta en marcha del ensayo, para los diferentes tipos de ensayo realizados.

5.2 Programa y trayectorias de los ensayos edométricos con control de succión

Esta parte de investigación se enfocó principalmente al comportamiento volumétrico de una arcilla de baja plasticidad no saturada (colapso, expansión y retracción), bajo cambios de succión y esfuerzo vertical neto. Se han considerado también de gran importancia los aspectos referentes al tiempo de equilibrio de humedad. Por tanto, los aspectos de ensayo se concibieron para determinar las propiedades hidráulicas del suelo (relaciones succión-humedad y comportamiento histerético, los cambios de humedad con el tiempo, las características de permeabilidad, etc.).

Se realizaron ensayos edométricos sobre muestras fabricadas de acuerdo con la técnica de esfuerzo controlado, obteniendo probetas ($r= 25 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$: $h/r = 0.8$) bajo los procedimientos de la sección 4.3.2. Las condiciones iniciales de las muestras se presentan en la Fig. 5.1 y se resumen en la Tabla 5.1.

El programa consistió en cuatro ensayos edométricos con control de succión, identificados con la nomenclatura: EDO-1, EDO-2, EDO-3, y EDO-4, en los que se han seguido varios tipos de trayectorias de succión y esfuerzo:

- ∅ Ciclos de carga–descarga a succión matricial constante (Fig. 5.2 – 5.5);
- ∅ Ciclos de humedecimiento–secado, a esfuerzo vertical neto constante (Fig. 5.2 – 5.5).

El esfuerzo máximo de preconsolidación de las muestras fabricadas fue de 0.6 MPa, salvo para el ensayo EDO-3 (0.3 MPa), como se indica en la Tabla 5.1 y Fig. 5.1.

Con las cuatro muestras se disponía de tres estados iniciales con la misma carga de compactación, y distinta humedad y densidad de dos muestras compactadas con la misma humedad y distinta carga de compactación y densidad seca, y de dos muestras compactadas con igual densidad seca, y distinta carga de compactación y humedad. Ello permite analizar el efecto de estos factores en el comportamiento del suelo compactado.

Tabla 5.1 Condiciones iniciales de las muestras. Ensayos edométricos con succión controlada.

Ensayo	w_0 %	ψ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	$\Phi\#$ MPa	ω_m-u_a MPa
EDO-1	11 \pm 0.2	1.61	0.680	43	0.8	0.6
EDO-2	8 \pm 0.2	1.54	0.749	28	2.1	0.6
EDO-3	11 \pm 0.2	1.52	0.783	39	0.9	0.3
EDO-4	12.5 \pm 0.2	1.70	0.594	55	0.5	0.6

Nota: ψ_{d0} : densidad seca inicial; ω_m-u_a : esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotropas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

Inicialmente, en todos los ensayos se impuso una pequeña presión vertical de 25 kPa sobre la muestra, con la finalidad de ajustar el mecanismo de transmisión de presiones; posteriormente las muestras se llevaron a unas condiciones iniciales (punto B de las Fig. 5.2 - 5.5). En esta etapa inicial, tanto la presión de aire (u_a) como la presión vertical (ω), son simultáneamente incrementadas manteniendo una presión vertical neta sobre la muestra ($\omega - u_a$) Ω 0.05 MPa, bajo condiciones no drenadas en la fase líquida hasta obtener la presión de aire deseada.

La presión de aire (u_a) seleccionada de 0.9 MPa, se mantuvo constante durante el desarrollo del ensayo. Empleando la técnica de traslación de ejes, se impuso la succión matricial inicial, aplicando una de agua (u_w) de 0.1 MPa ($u_a-u_w = 0.8$ MPa, punto B, Fig. 5.2 - 5.5).

En los ensayos EDO-1, EDO-2 y EDO-4, una vez finalizada la etapa de la imposición de las condiciones iniciales, se prosiguió con la primera trayectoria de incremento de la carga vertical neta, que se realizó por etapas bajo un valor de la succión matricial constante ($u_a - u_w = 0.8$ MPa), (trayectoria B \Downarrow C, Fig. 5.2-5.5), mediante los siguientes escalones de esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$): 0.1, 0.2, 0.4, y 0.6 MPa, (siendo 0.6 MPa el valor aplicado en el proceso de compactación), por otro lado, en el ensayo EDO-3. Los valores de los escalones del esfuerzo vertical neto fueron: 0.1, 0.2, y 0.3 MPa (siendo 0.3 MPa el valor aplicado en el proceso de compactación). Cada etapa de carga se mantuvo como mínimo 48 horas, controlando el desplazamiento vertical hasta su estabilización, además de mantener la condición de succión constante.

Posteriormente, se realizaron trayectorias de cambio de succión matricial, bajo esfuerzo vertical neto constante; se realizaron manteniendo una presión de aire constante de $u_a = 0.9$ MPa a través del disco poroso superior y controlando la presión de agua que actúa sobre el disco cerámico de alto valor de entrada de aire (AVEA) de 1.5 MPa. La presión de agua (u_w) se aplica instantáneamente y se mantiene durante el periodo de equilibrado en el cual se registran los cambios de volumen de agua que entran o salen de la muestra para determinar su cambio de humedad. En la primera trayectoria de humedecimiento, la succión se disminuyó de acuerdo con los siguientes valores: ($u_a - u_w$) = 0.8, 0.6, 0.3, 0.15 y 0.05 MPa (trayectoria C \Downarrow D, Fig. 5.2 - 5.5). Posteriormente, se realizó una trayectoria de secado, con varias etapas de cambio de succión: ($u_a - u_w$) = 0.05 y 0.3 MPa; salvo en el ensayo EDO-1, donde la trayectoria de secado se realizó en tres etapas: ($u_a - u_w$) = 0.05, 0.15 y 0.3 MPa (trayectoria D \Downarrow E, Fig. 5.2 - 5.5).

Después de aplicar un ciclo de carga y descarga manteniendo una succión de 0.3 MPa, la segunda trayectoria de humedecimiento se efectuó en una sola etapa de cambio de succión partiendo de un valor de ($u_a - u_w$) = 0.3 MPa hasta 0.05 MPa; salvo para el ensayo EDO-1, donde la trayectoria de humedecimiento se realizó en dos escalones comenzando con un valor de ($u_a - u_w$) = 0.3; se redujo a 0.15 MPa y 0.05 MPa (trayectoria G \Downarrow H, Fig. 5.2 - 5.5). En cada etapa, alrededor de cinco días fue tiempo suficiente para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje.

Las trayectorias de carga–descarga del esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$), bajo succión matricial constante se presentan en las Fig. 5.2-5.5. En dichas trayectorias, las lecturas del desplazamiento vertical, se corrigen contra las deformaciones propias del equipo causadas por incrementos de carga o descarga, de acuerdo con la sección 3.5.3 y la Fig. 3.11. Para evitar cambios de la succión matricial (disminución), las trayectorias de carga se realizaron con un número suficiente de escalones de incremento de carga vertical neta.

Dichos incrementos se aplicaron en escalones, usualmente entre 0.1 y 0.2 MPa; en caso de la descarga, las disminuciones de la carga se realizaron en escalones entre 0.2 y 0.4 MPa. En los incrementos del esfuerzo vertical neto por escalones, se presentó cierta influencia del tamaño de los escalones en los resultados de compresión, debido a una reducción de succión que se traduce en una pequeña compresión adicional (Das, 1983b). Estas discrepancias han sido explicadas para el estado virgen, por Sivakumar (1993) en términos de la superficie de fluencia LC, propuesta por Alonso, *et al* (1990). Las ventajas de un sistema de carga de forma continua sobre una técnica de carga por etapas, son discutidas por Sivakumar (1993), y Cui y Delage (1996). De acuerdo con estos autores, la técnica de carga por etapas, sobrestima la compresibilidad, y subestima el tamaño de la superficie de fluencia, por que el estado virgen se alcanza a valores más bajos de succión.

El esfuerzo vertical neto ($\sigma_v - u_a$) de carga y descarga se aplicó mediante un valor específico de presión de aire que actúa sobre el diafragma y el sistema del pistón, conforme a los valores de calibración en la sección 3.5.3. Los diferentes niveles de succión matricial seleccionados para realizar los ciclos de carga–descarga en los ensayos fueron: ($u_a - u_w$) = 0.3 y 0.05 MPa (trayectorias: E↘ F y H↘ I, Fig. 5.2-5.5). Las trayectorias de carga eran suficientemente amplias con el propósito de causar un arrastre de la superficie de fluencia, movida tras el fenómeno de colapso del suelo, y detectar cambios de rigidez que permitan obtener puntos de la superficie de fluencia. Los valores máximos de esfuerzo vertical neto son los indicados en la Tabla 5.2.

Las trayectorias de descarga se realizaron hasta alcanzar el mismo nivel del estado tensional inicial (F↘ G, Fig. 5.2-5.5), así como la descarga total sobre la muestra indicado con las letras I↘ J en las mismas figuras. Como ejemplo de los pasos en cada uno de los ensayos, en la Tabla 5.2 se presentan las etapas en cada trayectoria para los ensayos EDO-1 y EDO-3.

Tabla 5.2 Etapas en las trayectorias de los ensayos edométricos (EDO-1 y EDO-3).

Trayectoria	Succión matricial ($u_a - u_w$) MPa; $u_a = 0.9$ MPa	$\sigma_v - u_a$ * MPa
Carga: B-C	0.8	0.05, 0.2, 0.4 y 0.6
Mojado: C-D	0.6, 0.3, 0.15 y 0.05	0.6
Secado: D-E	0.15 y 0.3	0.6
Carga: E-F	0.3	0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 y 1.6
Descarga: F-G	0.3	1.4, 1.2, 1.0, 0.8 y 0.6
Mojado: G-H	0.15 y 0.05	0.6
Carga: H-I	0.05	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 y 2.4
Descarga: I-J	0.05	2.2, 2.0, 1.8, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 y 0.05

* $\sigma_v - u_a$: esfuerzo vertical neto

Dentro del programa de ensayos se han completado catorce ensayos de humedecimiento–secado, realizados en un solo ciclo o en dos ciclos con un total de 29 etapas de equilibrio de succión, ocho ciclos de carga–descarga en 128 etapas, y cuatro trayectorias de carga en 15 etapas. Se llevaron a cabo registros periódicos desde el inicio hasta el final del ensayo de los cambios de volumen y contenidos de agua. En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las principales características de los diferentes ensayos (identificación, trayectoria de esfuerzo y el lapso de tiempo en realizar dicha trayectoria). En estos ensayos se invirtió un periodo de aproximadamente 340 días de trabajo en la nueva célula edométrica con control de succión.

Finalmente, hay que señalar que algunos ensayos aunque se cancelaron y no se incluyeron en esta memoria, se utilizaron para observar la reproducibilidad con otros equipos, y la repetibilidad con la misma célula, presentando en general una buena repetibilidad y consistencia. Las causas de su cancelación fueron principalmente los problemas de interrupción en el sistema de suministro eléctrico, y las correspondientes repercusiones sobre el sistema neumático, cavitación del sistema de presión de agua debido al aire acumulado por difusión debajo de la piedra porosa de alto valor de entrada de aire, o por el deterioro de las mismas.

Tabla 5.3 Serie de los ensayos edométricos, bajo succión controlada.

Identificación del ensayo	Trayectoria de Esfuerzos	Descripción	Periodo (días)
EDO – 1	a) carga	4 etapas	7
	b) mojado-secado-mojado	8 etapas, $(\omega_v-u_a)=0.6$ MPa	42
	c) carga-descarga (2 ciclos)	32 etapas, $(u_a-u_w)= 0.3, 0.05$ MPa	51
EDO – 2	a) mojado	1 etapa	8
	b) carga	4 etapas	9
	c) mojado-secado-mojado	6 etapas, $(\omega_v-u_a)=0.6$ MPa	29
	d) carga-descarga (2 ciclos)	35 etapas, $(u_a-u_w)= 0.3, 0.05$ MPa	59
EDO – 3	a) mojado	1 etapa	3
	b) carga	3 etapas	4
	c) mojado-secado-mojado	6 etapas, $(\omega_v-u_a)=0.3$ MPa	31
	d) carga-descarga (2 ciclos)	32 etapas, $(u_a-u_w)= 0.3, 0.05$ MPa	38
EDO – 4	a) mojado	1 etapa	5
	b) carga	4 etapas	8
	c) mojado-secado-mojado	6 etapas, $(\omega_v-u_a)=0.6$ MPa	22
	d) carga-descarga (2 ciclos)	29 etapas, $(u_a-u_w)= 0.3, 0.05$ MPa	49

5.3. Programa y trayectorias de los ensayos isótropos realizados en la mini-célula isótropa rígida

En este apartado se describe el método, programa y trayectorias de esfuerzos en la serie de ensayos isótropos realizados con la mini – célula isótropa rígida con control de succión. En la sección 3.6 y en el Anexo B, se mencionan las características de la mini-célula isótropa rígida, que puede resumirse en la posibilidad de conocer el estado tensional aplicado al suelo, y la del reducido tamaño de la muestra a ensayar.

El programa de ensayos y las trayectorias seguidas tuvieron como propósito analizar el comportamiento deformacional de un suelo no saturado asociado a los cambios de succión, así como obtener la forma y el cambio de tamaño de la superficie de fluencia (LC) (Loading–collapse), propuesta por Alonso, *et al* (1990), durante un proceso de humedecimiento o de un incremento de la carga isótropa sobre la muestra.

El programa de investigación se realizó en muestras ($r= 10$ mm, $h = 20$ mm: $h/r = 2$) con diferentes densidades, fabricadas de acuerdo con la técnica de esfuerzo controlado. En la Tabla 5.4 y en la Fig. 5.7a se presentan las condiciones iniciales de las muestras para los ensayos isótropos. Estas cuatro condiciones son análogas a las empleadas en los ensayos edométricos.

Tabal 5.4 Condiciones iniciales de las muestras. Ensayos isótopos (mini-célula isótropa rígida).

Ensayo	w_0 %	Ψ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	$\Phi\#$ MPa	$\omega_m - u_a$ MPa
ISO-1	11 \pm 0.2	1.67	0.620	48	0.8	0.6
ISO-2	8 \pm 0.2	1.55	0.743	29	2.1	0.6
ISOW-1	11 \pm 0.2	1.66	0.629	47	0.8	0.6
ISOW-2	8 \pm 0.2	1.52	0.777	28	2.1	0.6
ISOW-3	11 \pm 0.2	1.53	0.776	38	0.9	0.3
ISOW-4	12 \pm 0.2	1.69	0.598	54	0.6	0.6

Nota: $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isótropas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

En el Anexo B se describe a detalle la metodología de los ensayos isótopos. De igual manera que en los ensayos edométricos, inicialmente las muestras fueron isótopamente cargadas a contenidos de agua constante hasta un esfuerzo medio neto ($\omega_m - u_a$) deseado estableciendo así unas condiciones iniciales del ensayo, señaladas con la letra B de las Fig. 5.6 y 5.8.

En las diferentes muestras se realizaron diferentes trayectorias de esfuerzo y succión:

- ≠ Trayectorias de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante (Fig. 5.8)
- ≠ Ciclos de humedecimiento–secado a esfuerzo medio neto constante (Fig. 5.6)
- ≠ Ciclos de carga–descarga bajo succión matricial constante (Fig. 5.6)

El programa consistió en seis ensayos, organizados en dos grupos dependiendo de la trayectoria tensional realizada. En los ensayos ISO–1 y ISO–2, las letras ISO indican ensayos isótopos con ciclos de humedecimiento–secado bajo esfuerzo medio neto constante y ciclos de carga–descarga a succión constante; la unidad hace referencia a la condición del punto de esfuerzo inicial de la muestra de acuerdo con la Fig. 5.7a. En estos ensayos se siguieron trayectorias en forma análoga a la de los ensayos edométricos, tratando de obtener puntos de la superficie de fluencia. Por otro lado, en los ensayos ISOW–1, ISOW–2, ISOW–3 y ISOW–4, se tomó el siguiente criterio de identificación: las letras ISO, corresponden a ensayos isótopos, y la W indica que se realizaron únicamente trayectorias de humedecimiento, bajo carga constante; la unidad corresponde a la condición del punto de esfuerzo inicial de la muestra (Fig. 5.7a). En estos ensayos se trataba de estudiar el comportamiento del suelo en trayectorias de reducción de succión que partían de un estado tensional por debajo del aplicado durante la compactación.

Los ciclos de humedecimiento–secado bajo esfuerzo isótopo constante ($\omega_m - u_a = 0.6$ MPa) se aplicaron variando la succión matricial ($u_a - u_w$), empleando la técnica de traslación de ejes. En los ensayos ISO-1 y ISO-2, en la trayectoria de humedecimiento–secado se varió la succión matricial de forma continua manteniendo una presión de aire (u_a) constante de 0.8 y 0.9 MPa respectivamente. La presión de agua se controló con un motor-reductor que imponía una velocidad de variación de la succión constante igual a 0.02 MPa/día, hasta alcanzar la succión matricial mínima deseada (0.02 MPa). La trayectoria de humedecimiento se inició con un valor de la succión matricial de 0.8 MPa en el ensayo ISO-1, y de 0.7 MPa en el ensayo ISO-2 (trayectoria C \Downarrow D, Fig. 5.6). Posteriormente, la trayectoria de secado se

efectuó incrementando continuamente la succión matricial con la misma velocidad de variación (0.02 MPa/día).

En los ciclos de carga–descarga isótropa la disminución de la presión de cámara se impuso en forma continua (0.04 MPa/día) por medio de un motor reductor a una velocidad de variación constante (Anexo B), hasta alcanzar el esfuerzo medio neto deseado, manteniendo la succión matricial a un valor constante. En los ensayos ISO-1 y ISO-2, se realizaron dos trayectorias de carga isótropa: a) la muestra se carga hasta el mismo valor aplicado en el proceso de compactación de 0.6 MPa, bajo succión matricial constante de 0.7 y 0.8 MPa respectivamente (trayectoria B↓ C, Fig. 5.6); y b) la carga isótropa se extendió hasta cruzar la superficie de fluencia (LC) movida por el fenómeno de colapso del suelo; en ambos ensayos, la succión matricial se mantuvo constante a un valor de 0.2 MPa (E↓ F, Fig. 5.6). Los valores máximos del esfuerzo medio neto se muestran en la Tabla 5.5 y en la Fig. 5.6. La trayectoria de la descarga isótropa, se realizó en forma continua a una velocidad de variación constante de 0.1 MPa/día (F↓ G, Fig. 5.6).

En los ensayos ISOW-1, ISOW-2 y ISOW-4, inicialmente la carga isótropa se incrementó en forma continua a una velocidad de variación de 0.04 MPa/día, bajo succión constante de 0.8, 0.8 y 0.5 MPa, respectivamente. El esfuerzo medio neto ($\sigma_m - u_a$) se llevó hasta un valor de 0.3 MPa (valor menor del proceso de compactación). En el ensayo ISOW-3, la carga isótropa alcanzada fue de 0.2 MPa, bajo succión constante de 0.8 MPa (trayectoria B↓ C, Fig. 5.8). El objetivo de la trayectoria es quedar dentro de zona elástica (LC) resultante del proceso de compactación, y así tratar de obtener por medio de una reducción de la succión puntos que definan la forma de la superficie de fluencia. En la Tabla 5.5, se recogen los valores de la carga neta aplicada en forma continua en las trayectorias de carga y descarga en los ensayos.

Por otro lado, en la trayectoria de humedecimiento en los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3, la presión de aire se mantuvo constante a un valor de $u_a = 0.9$ MPa, iniciando la trayectoria con un valor de la succión matricial de 0.8 MPa y reduciendo en forma continua la succión matricial (0.02 MPa/día) hasta un valor de 0.01 MPa, bajo un esfuerzo medio neto constante de 0.3 MPa (ensayos ISOW-1 y ISOW-2) y de 0.2 MPa (ensayo ISOW-3) (C↓ D, Fig. 5.8). En el ensayo ISOW-4, compactado con mayor humedad, la presión de aire fue impuesta a un valor de 0.6 MPa, y se inició la trayectoria de humedecimiento con un valor de la succión matricial de 0.5 MPa (punto de esfuerzo C, Fig. 5.8). La presión de agua (u_w) se incrementó en forma continua (0.02 MPa/día) hasta un valor de 0.6 MPa, obteniéndose una succión matricial nula ($u_a - u_w = 0.0$ MPa, bajo un esfuerzo medio neto constante de 0.3 MPa (tanto la presión de agua como la presión de aire se suministraron con el mismo regulador de presión, para garantizar la igualdad de las presiones intersticiales) (C↓ D, Fig. 5.8).

Dentro del programa de ensayos isótopos realizados con la mini–célula isótropa rígida, se completaron diez ensayos de humedecimiento–secado, bajo esfuerzo medio neto constante, en un solo sentido o en forma de ciclo, con una velocidad de variación constante de la presión de agua (u_w) igual a 0.02 MPa/día. Por otra parte, se realizaron dos ciclos de carga–descarga y seis trayectorias de aumento de carga, bajo succión constante con incrementos del esfuerzo medio neto igual a 0.04 MPa/día. Las principales características de los ensayos se resumen en la Tabla 5.6, donde se observa que el lapso de tiempo invertido es de aproximadamente 450 días de trabajo.

Tabla 5.5 Valores del esfuerzo medio neto alcanzados en trayectorias de carga o descarga a succión constante (mini-célula isótropa rígida).

Ensayo	Trayectoria * carga-descarga	$\omega_m - u_a$: inicio MPa	$\omega_m - u_a$: final MPa
ISO-1 y ISO-2	B↓ C	0.025	0.60
	E↓ F	0.60	1.30
	F↓ G	1.30	0.025
ISOW-1, ISOW-2 y ISOW-4	B↓ C	0.025	0.30
ISOW-3	B↓ C	0.025	0.20

* Figuras 5.6 y 5.8

Como en el caso de los edómetros, algunos ensayos se desecharon por distintos problemas (intrusión del agua de confinamiento a la muestra, por rotura de la membrana, y la fractura de los elementos interfase), pero fueron útiles para la puesta a punto del equipo y observar la repetibilidad de los resultados en los tramos de ensayo que fue necesario repetir.

Tabla 5.6 Serie de ensayos Isótopos (mini-célula isótropa rígida).

Identificación n Del ensayo	Trayectoria de esfuerzos	Descripción: $h/r=2$ $\div vv$ (MPa/día), $s = (u_a - u_w)$, $p = (\omega_m - u_a)$	Periodo (días)
ISO - 1	a) carga isótropa	$\div vv=0.04$, $s=0.8$ MPa (p_{max} 0.6 MPa)	15
	b) mojado-secado	$\div vv=0.02$, $p=0.6$ MPa (s_{max} 0.02-0.2 MPa)	43
	c) carga-descarga	$\div vv=0.04$, 0.1, $s=0.2$ MPa (p_{max} 1.3 MPa)	30
ISO - 2	a) equilibrio	$s=0.8$ MPa, $p= 0.025$ MPa	3
	b) carga isótropa	$\div vv=0.04$, $s=0.8$ MPa (p_{max} 0.6 MPa)	15
	c) mojado-secado	$\div vv=0.02$, $p=0.6$ MPa (s_{max} 0.02-0.2 MPa)	48
	d) carga-descarga	$\div vv=0.04$, 0.1, $s=0.2$ MPa (p_{max} 1.3 MPa)	30
ISOW - 1	a) carga isótropa	$\div vv=0.04$, $s=0.8$ MPa (p_{max} 0.3 MPa)	7.5
	b) mojado	$\div vv=0.02$, $p=0.3$ MPa (s_{max} 0.01 MPa)	39.5
ISOW - 2	a) equilibrio	$s=0.8$ MPa, $p= 0.025$ MPa	3
	b) carga isótropa	$\div vv=0.04$, $s=0.8$ MPa (p_{max} 0.3 MPa)	7.5
	c) mojado	$\div vv=0.02$, $p=0.3$ MPa (s_{max} 0.01 MPa)	39.5
ISOW - 3	a) carga isótropa	$\div vv=0.04$, $s=0.8$ MPa (p_{max} 0.2 MPa)	5
	b) mojado	$\div vv=0.02$, $p=0.2$ MPa (s_{max} 0.01 MPa)	39.5
ISOW - 4	a) carga isótropa	$\div vv=0.04$, $s=0.5$ MPa (p_{max} 0.3 MPa)	7.5
	b) mojado	$\div vv=0.02$, $p=0.3$ MPa (s_{max} 0.01 MPa)	24.5
	c) equilibrio	$(u_a - u_w) = 0.0$ MPa, $(\omega_m - u_a) = 0.3$ MPa	46

$\div vv$: velocidad de cambio de succión o esfuerzo medio, según el tipo de trayectoria que se considere.

5.4 Programa y trayectoria del ensayo isótropo realizado en la célula triaxial con control de succión

El programa consistió en un ensayo que se identificó como TISO-1, donde T se refiere a la célula triaxial con control de succión, las letras ISO indica la realización de un ensayo isótropo y la unidad hace referencia a la condición del punto de esfuerzo inicial de la muestra de acuerdo a la Fig. 5.7b. El ensayo se diseñó para proporcionar parámetros de un modelo elastoplástico, tales como $N(s)$, $\zeta(s)$, ρ y p_0 , así como la descripción de la forma y expansión de la superficie de fluencia (LC) propuesta por Alonso, *et al* (1990).

Los procedimientos de montaje de la probeta en la célula triaxial y de la puesta en marcha de los ensayos se encuentran en el Anexo C. En la sección 4.3.2 se describe la técnica de fabricación de las probetas, y en la sección 3.7.1 se describe en detalle la célula triaxial (Fig. 3.21) utilizada en esta investigación. El ensayo se realizó sobre una muestra fabricada de acuerdo con técnica de esfuerzo controlado con un diámetro de 38 mm y altura de 76 mm ($h/r = 4$). Para el ensayo de compresión isótropa, el pistón inferior de la cámara de presión de carga vertical, se bloqueó a una altura específica por un cilindro de acero de 65 mm de altura instalado entre la base y el pistón inferior (Fig. 3.21a).

La célula de carga se desenrosca tanto del cabezal de la muestra como del pistón superior, lo que hace difícil que la muestra permanezca en posición vertical durante el montaje o trayectorias de carga-descarga. Para evitar este problema se usa un aparato de alineación no-contacto para control de la inclinación de la probeta que reemplaza a la célula de carga. El aparato de alineación no-contacto, roscado al pistón superior, se mantiene 5 mm por encima del cabezal por medio de un tornillo bloqueador externo. El aparato de alineación prevé una inclinación máxima de $0^\circ 45'$ de la muestra durante las diferentes etapas (Fig. 3.22b). La muestra se sometió a un estado de esfuerzo isótropo, con la muestra sobre la base bloqueada, quedando las caras laterales y la cara superior, libres de contacto mecánico.

En la Tabla 5.7 se presentan los valores del estado inicial de la muestra ensayada, y en la Fig. 5.7b se indica el estado inicial en el plano Próctor ($w_0 = 11\%$, $\psi_{d0} = 1.66 \text{ g/cm}^3$).

Inicialmente, se impuso una baja presión de 25 kPa con objeto de minimizar errores asociados con el ajuste de los LVDT internos, y después se impone a la muestra las condiciones iniciales de ensayo (punto de esfuerzo A, Fig. 5.9). De igual manera que en los ensayos edométricos, tanto la presión de aire de poros (u_a) como la presión de confinamiento, se incrementaron simultáneamente por etapas manteniendo una diferencia de presión media neta sobre la muestra de $(\sigma_m - u_a) < 25 \text{ kPa}$, bajo condiciones no drenadas en la fase líquida. Se optó por una presión de aire (u_a) de 0.9 MPa, que se mantuvo constante durante el desarrollo del ensayo. La succión matricial se impuso en la muestra empleando la técnica de traslación de ejes, manteniendo la presión de aire constante ($u_a = 0.9 \text{ MPa}$) y controlando la presión de agua (u_w). La succión inicial de 0.8 MPa se impuso aplicando una presión de agua de 0.1 MPa.

La trayectoria de esfuerzos es análoga a la del ensayo EDO-1, pero en condiciones isótropas. Se realizaron trayectorias de cambio de succión y de esfuerzo, bajo los siguientes criterios (Fig. 5.9):

- ∄ Ciclos de carga–descarga a succión matricial constante
- ∄ Ciclos de humedecimiento–secado a esfuerzo medio neto constante

Tabla 5.7 Condiciones iniciales de la muestra. Ensayo isótropo con control de succión (célula triaxial con control de succión).

Ensayo	w ₀ %	ψ ₀ g/cm ³	e ₀	Sr ₀ (%)	..# MPa	ω _m - u _a MPa
TISO-1	110.2	1.66	0.627	48	0.8	0.6

ω_m-u_a: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isótropas; ..: succión total inicial (técnica psicrométrica).

La muestra se somete a una trayectoria de carga isótropa (trayectoria A↓ B, Fig. 5.9) bajo succión constante de 0.8 MPa; la presión de confinamiento se aumentó por etapas hasta un esfuerzo medio neto (ω_m-u_a) = 0.6 MPa (siendo 0.6 MPa el esfuerzo de preconsolidación obtenido en el proceso de compactación); cada etapa de carga isótropa (0.05, 0.2, 0.4 y 0.6 MPa) se mantuvo aproximadamente por dos días, controlando su deformación volumétrica hasta su equilibrio.

Las trayectorias de humedecimiento–secado, bajo un esfuerzo isótropo constante de (ω_m- u_a) = 0.6 MPa se realizaron variando la succión matricial; dichas trayectorias mantuvieron la presión de aire constante (u_a = 0.9 MPa) previamente indicada, y controlando la presión de agua (u_w) que actúa sobre el disco cerámico (AVEA) del cabezal como del pedestal. Los cambios de presión de agua (u_w) se aplican instantáneamente por escalones.

En la primera trayectoria de humedecimiento (B↓ C, Fig. 5.9), las etapas de cambio de succión fueron: (u_a-u_w) = 0.4, 0.3, 0.1 y 0.02 MPa. Posteriormente, la muestra se sometió a una trayectoria de secado en las siguientes etapas: 0.02, 0.1 y 0.15 MPa (C↓ D, Fig. 5.9). La segunda trayectoria de humedecimiento (F↓ G, Fig. 5.9) se hizo con la muestra sobreconsolidada en una sola etapa de cambio de succión de 0.15 a 0.02 MPa; el estado sobreconsolidado se obtuvo después de la trayectoria de carga–descarga (D↓ E↓ F, Fig. 5.9). En cada etapa de humedecimiento y secado, se invirtió alrededor de diez días, tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio en términos de deformación y drenaje.

En las trayectorias de carga–descarga isótropa bajo succión constante, se tomaron los mismo criterios que en los ensayos edométricos. La carga isótropa se realizó en incrementos iguales de 0.2 MPa con el objetivo de evitar cambios en la succión matricial; la descarga isótropa también se realizó en igual de disminución de 0.2 MPa (ver trayectoria E↓ F y H↓ I Fig. 5.9). Las trayectorias de carga fueron suficientemente extendidas con la finalidad de cruzar la superficie de fluencia.

El primer ciclo de carga–descarga isótropa bajo una succión constante de (u_a- u_w) = 0.15 MPa, se efectuó con la muestra ligeramente sobreconsolidada (trayectoria D↓ E, Fig. 5.9) tras un fenómeno de colapso desarrollado en la trayectoria B↓ C (Fig. 5.9); el segundo ciclo de carga–descarga isótropa se realizó en la trayectoria H↓ I (Fig. 5.9), bajo una succión constante de (u_a- u_w) = 0.02 MPa en una muestra sobreconsolidada tras un ciclo de carga y descarga (D↓ E↓ F, Fig.5.9).

En la Tabla 5.8 se presentan los valores de cada una de las etapas seguidas en los ciclos de humedecimiento–secado bajo un esfuerzo medio neto constante y en los ciclos de carga–descarga bajo una succión constante. La presión de aire (u_a), como se ha mencionado, se mantuvo constante a un valor de 0.9 MPa en todo el ensayo.

Tabla 5.8 Trayectorias realizadas en el ensayo isótropo (célula triaxial con control de succión).

Trayectoria	$(u_a - u_w)$ MPa	$(\omega_m - u_a)$ MPa
Equilibrio: A	0.8	0.025
Carga: A↓ B	0.8	0.05, 0.2, 0.4 y 0.6
Mojado: B↓ C	0.4, 0.3, 0.1 y 0.02	0.6
Secado: C↓ D	0.10 y 0.15	0.6
Carga: D↓ E	0.15	0.7, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.4
Descarga: E↓ F	0.15	1.2, 1.0, 0.8 y 0.6
Mojado: F↓ G	0.15 y 0.02	0.6
Carga: G↓ H	0.02	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2.0
Descarga: H↓ I	0.02	1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 y 0.05

Se completaron dos trayectorias de humedecimiento y una de secado a esfuerzo medio constante, en un total de nueve etapas de equilibrio de succión. Por otra parte, se realizaron dos ciclos de carga–descarga en 27 etapas, y una trayectoria de carga en cuatro etapas. En la Tabla 5.9 se presenta un resumen de las principales características de la trayectoria de esfuerzo (identificación, trayectoria de esfuerzo y el tiempo en realizar dicha trayectoria). Hay que resaltar que en este único ensayo se invirtió un periodo de 147 días.

Tabla 5.9 Trayectoria seguida en el ensayo isótropo (célula triaxial con control de succión).

Identificación del ensayo	Trayectoria de esfuerzos	Descripción, $h/r=4$, $s = (u_a - u_w)$, $p=(\omega_m - u_a)$, $v_q = 1.0 \sigma m/min$	Periodo (días)
TISO – 1	a) equilibrio	$s = 0.8$ MPa, $p = 0.025$ MPa	5
	b) carga isótropa	4 etapas a $s = 0.8$ MPa, $p_{max} = 0.6$ MPa	9
	c) mojado-secado	6 etapas, $p = 0.6$ MPa, $s = 0.02 - 0.15$ MPa	64
	d) carga-descarga	10 etapas a $s = 0.15$ MPa, $p_{max} = 1.4$ MPa	28
	e) mojado	1 etapas a $p = 0.6$ MPa, $s_{min} = 0.02$ MPa	5
	f) carga-descarga	18 etapas a $s = 0.02$ MPa, $p_{max} = 2.0$ MPa	36

5.5 Programa de ensayos y trayectorias de esfuerzos de los ensayos triaxiales en muestras no saturadas

La investigación experimental se efectuó con el propósito de determinar los parámetros de resistencia al corte, y examinar la respuesta tanto mecánica (tenso–deformacional) como hidráulica, (cambio de humedad) asociadas a los cambios de succión y del esfuerzo desviador. En los ensayos se ha pretendido constatar el ya conocido efecto de la succión en la resistencia de suelo, pero además el de seguir distintos tipos de trayectorias previas a la rotura en el plano (p, s) para observar su influencia en el comportamiento de suelo en la fase de corte. Durante todo el desarrollo de los ensayos se midieron tanto los cambios mecánicos como los de humedad.

5.5.1 Programa y trayectorias de esfuerzos de los ensayos triaxiales realizados en la célula triaxial con control de succión

Las probetas se prepararon de acuerdo con la técnica de esfuerzo controlado (sección 4.3.2), empleando el método de compactación estática en condiciones isotropas descrito en la sección 4.3.1.1. Los ensayos se ejecutaron en la célula triaxial con control de succión, diseñada específicamente para ensayos en suelos no saturados; no obstante el diseño del equipo también permite realizar ensayos en muestras saturadas ($\lambda = 38$ mm y $h = 76$ mm); la célula se describe en la sección 3.7 (Fig. 3.21). Una de las innovaciones de la célula triaxial es la obtención de las deformaciones locales tanto radial (κ_r) como axial (κ_a) en el centro de la muestra, y medidas globales en contenidos de agua y cambio de volumen del suelo. Los procedimientos de montaje del espécimen en la célula triaxial se describen en el Anexo C, así como los pasos previos al montaje y puesta en marcha de los ensayos.

Los ensayos de laboratorio se programaron para seguir trayectorias de esfuerzos en forma tal que permitieran validar las hipótesis en el modelo elastoplástico propuesto por Alonso, *et al* (1990). Para ello se realizaron diferentes ensayos de corte, bajo una velocidad de deformación constante de $(v_d) = 1.0$ σ m/min a succión matricial constante. Se analizaron muestras normalmente (NC) y sobreconsolidadas (OC), con el estado sobreconsolidado inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte:

- ∉ Un proceso de carga–descarga isotropa a succión constante
- ∉ Cambios de succión (humedecimiento–secado), bajo esfuerzo medio neto constante, con una deformación de colapso dominante.
- ∉ Un elevado incremento–disminución de la succión bajo condiciones libres de retracción–expansión.

Por otro lado, las muestras normalmente consolidadas se estudiaron al nivel máximo de esfuerzo medio neto que haya experimentado la muestra, bajo succión constante y también en otras muestras después de un previo fenómeno de colapso.

Todas las muestras se compactaron con la misma carga y humedad. En la Tabla 5.10 se indican los valores de las condiciones iniciales de las muestras ensayadas y en la Fig. 5.10 se presenta en el plano Proctor la condición inicial de las muestras. Estas condiciones iniciales son iguales a las de los ensayos ISO-1, ISOW-1 y TISO-1.

La nomenclatura para identificar los diferentes ensayos está de acuerdo a una descripción general de la trayectoria del ensayo, por ejemplo: *IS-NC-06*, la primera letra indica la etapa de carga Isótropa (I); la segunda letra la etapa de corte (S) (Shearing), y las dos últimas letras (NC) la condición de la muestra antes del corte, NC = normalmente consolidado o OC = sobreconsolidado; el número indica la presión radial neta de cámara durante la fase de corte.

Por otra parte en la nomenclatura de los ensayos *IWS-NC-01*, la primera letra se refiere también a la etapa de compresión Isótropa (I); la segunda indica que se realizaron cambios en contenido de agua (W), o cambios de succión; la tercera la etapa de corte (S); la cuarta y quinta letra nos indican la condición de la muestra antes del corte (normalmente consolidado o sobreconsolidado); el número corresponde al valor máximo o mínimo de succión a la que se somete a la muestra en el ensayo.

Tabal 5.10 Condiciones iniciales de las muestras. Ensayos de compresión triaxial.

Ensayo	w_0 %	Ψ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	$\Phi\#$ MPa	$\omega_m - u_a$ MPa
IS – OC – 03	11 \pm 0.2	1.67	0.625	47.7	0.8	0.6
IS – NC – 06	11 \pm 0.2	1.67	0.623	47.9	0.8	0.6
IS – NC – 12	11 \pm 0.2	1.66	0.629	47.4	0.8	0.6
IS – OC – 06	11 \pm 0.2	1.66	0.629	47.4	0.8	0.6
IWS – OC – 87	11 \pm 0.2	1.67	0.622	47.9	0.8	0.6
IWS – OC – 01	11 \pm 0.2	1.67	0.624	47.8	0.8	0.6
IWS – NC – 02	11 \pm 0.2	1.65	0.644	46.3	0.8	0.6

Nota: $\omega_m - u_a$: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isotrópicas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

El programa experimental se ha clasificado en dos grupos de ensayos; el primero son aquellos identificados con las letras *IS*; y el segundo con *IWS*, sumando un total de siete ensayos de compresión triaxial a velocidad de deformación constante, donde se siguieron diferentes trayectorias de esfuerzos antes de aplicar un esfuerzo desviador; las trayectorias seguidas en los ensayos se indican en las Figs. 5.11 - 5.19).

De igual manera que en los ensayos isotrópicos realizados en la misma célula triaxial, al inicio del ensayo la presión de aire (u_a) y la presión de confinamiento (ω_b), se incrementaron simultáneamente por etapas, manteniendo un valor ($\omega_m - u_a$) Ω 25 kPa bajo condiciones no drenadas en la fase líquida. Los ensayos iniciaron en el punto de esfuerzo A de las Figs. (5.11–5.19) a un esfuerzo medio neto ($\omega_m - u_a$) = 0.025 MPa, y una succión matricial ($u_a - u_w$) = 0.8 MPa; se optó por una presión de aire (u_a) de 0.9 MPa, que se mantuvo constante en el desarrollo del ensayo.

Ensayos del grupo *IS*

Cada ensayo de esta serie consistió en tres etapas: 1) etapa de equilibrio inicial; 2) etapa de compresión isotrópica, y 3) etapa de aplicación del esfuerzo desviador.

1) En la etapa de equilibrio inicial, se imponen las condiciones iniciales de esfuerzo y succión de ensayo (punto de esfuerzo A de las Fig. 5.11 – 5.14), bajo los siguientes valores: succión matricial de ($u_a - u_w$) = 0.8 MPa; esfuerzo medio neto ($\omega_m - u_a$) = 0.025 MPa; y un pequeño desviador (q) de 10 kPa, de forma que la probeta siempre esté en contacto con la célula de carga. En esta etapa las condiciones iniciales se mantienen con un mínimo de 72 horas, para garantizar las condiciones iniciales de ensayo.

2) Al finalizar la etapa de equilibrio, la muestra se somete a una trayectoria de carga isotrópica (trayectoria A \Downarrow B, Fig. 5.11 – 5.14), bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa); la presión de confinamiento se aumenta por etapas hasta el esfuerzo medio neto ($\omega_m - u_a$) deseado. Los incrementos de carga isotrópica se aplicaron mediante escalones iguales de valor comprendido entre 0.1 MPa y 0.2 MPa. Cada etapa de carga se mantuvo aproximadamente durante 48 horas controlando la deformación volumétrica hasta su equilibrio; por otro lado para evitar cambios importantes en la succión (disminución) se realizaron suficientes etapas de carga.

3) La etapa de corte se realizó a una velocidad de deformación constante $v_q = 1.0 \text{ } \sigma\text{m/min}$, bajo una succión constante de $(u_a - u_w) = 0.8 \text{ MPa}$ y una presión de cámara neta de $(\sigma_b - u_a) = 0.3, 0.6 \text{ y } 1.2 \text{ MPa}$, según el ensayo considerado. Se seleccionó una velocidad de corte suficientemente lenta, siendo la misma para todos los ensayos tanto del grupo IS como del ISW; con ello se trata de asegurar la disipación continua de las presiones intersticiales generadas (Josa, 1988).

Para el cálculo de la velocidad de corte (v_q), Sivakumar (1993), hace mención de la expresión 5.1 presentada por Bishop y Henkel (1982), que estima el tiempo necesario para que ocurra una disipación del 95 % de la presión de agua (u_w) en ensayos triaxiales drenados en muestras saturadas.

$$c_v \mid \frac{K}{v_w m_v} ; \quad m_v \mid \frac{\div \kappa}{\div \omega}$$

$$t \mid \frac{20 h^2}{0.75 c_v} \tag{5.1}$$

Donde h es la altura de la muestra; c_v = coeficiente de consolidación; m_v = coeficiente de deformación volumétrica; K = permeabilidad del suelo al agua; v_w = densidad del agua.

Sivakumar (1993) haciendo uso de esta ecuación obtuvo un tiempo de rotura de 11 días en ensayos triaxiales en muestras de caolín en condiciones no saturadas ($h = 10 \text{ cm}$), alcanzando deformaciones de corte de 20 a 35 % a una velocidad de desplazamiento de $1.2 \text{ } \sigma\text{m/min}$. Aplicando la misma ecuación (5.1) para los datos del material en estudio ($K = 2.6 \times 10^{-9} \text{ m/s}$; $m_v = 0.005 \text{ m}^2/\text{kK}$; $v_w = 9.8 \text{ kN/m}^3$; $2h = 0.076 \text{ m}$; $c_v = 5.2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) presentados, se obtiene un tiempo de falla de 8.5 días bajo condiciones drenadas.

Sin embargo, dado que la permeabilidad no saturada es menor que la saturada, se optó por un tiempo de falla aproximadamente de 12 días alcanzando una deformación axial (κ_f) del orden de 20 %, a una velocidad constante de desplazamiento de $1.0 \text{ } \sigma\text{m/min}$. La forma de comprobar que la velocidad de falla no generara presiones de poro en la muestra, fue deteniendo la velocidad de deformación por un lapso de 36 horas, durante el cual no se detectaron cambios de volumen en la muestra, ni alteraciones en el contenido de agua.

En la figura 5.11, se presenta la trayectoria de esfuerzos para el ensayo (IS-OC-03) en el espacio de esfuerzos (p, q, s), donde p es el esfuerzo medio neto; s la succión matricial; y q el esfuerzo desviador. Al finalizar la etapa de equilibrio, la muestra se sometió a una trayectoria de compresión isótropa (trayectoria A \Downarrow B, Fig. 5.11), bajo succión constante ($s = 0.8 \text{ MPa}$); la presión de confinamiento se incrementó en dos etapas hasta un esfuerzo medio neto de $(\sigma_m - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$. La muestra resulta sobreconsolidada debido al estado alcanzado en el proceso de compactación. Finalmente se impuso la etapa de corte a una velocidad de deformación constante de $1.0 \text{ } \sigma\text{m/min}$, (B \Downarrow C, Fig. 5.11) bajo succión y presión neta de cámara constante ($s = 0.80 \text{ MPa}$, y $(\sigma_b - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$), hasta un valor máximo de $(p) = 0.697 \text{ MPa}$, y $q = 1.19 \text{ MPa}$ en que se produjo la rotura del suelo.

En el ensayo (IS-NC-06), la etapa de corte se realizó en una muestra normalmente consolidada. En la Fig. 5.12 se aprecia la trayectoria de esfuerzos en el espacio de esfuerzos (p, q, s). Al término de la

etapa de equilibrio, la muestra se sujetó a una trayectoria de compresión isótropa (trayectoria A \Downarrow B, Fig. 5.12), bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa); la presión de confinamiento fue aumentada por etapas hasta un esfuerzo medio neto de 0.6 MPa, (siendo 0.6 MPa el esfuerzo de preconsolidación obtenida en el proceso de compactación); cada etapa de carga isótropa (0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 MPa) se mantuvo aproximadamente por dos días. La etapa de corte (B \Downarrow C, Fig. 5.12) sobre la muestra normalmente consolidada se realizó bajo succión constante ($s = 0.80$ MPa) y presión radial neta de cámara constante ($\omega_b - u_a = 0.6$ MPa hasta rotura ($p = 1.19$ MPa, y $q = 1.76$ MPa).

Por otro lado, en el ensayo (IS-NC-12), la muestra se sometió a una trayectoria de carga isótropa hasta un valor de esfuerzo medio neto de $(\omega_n - u_a) = 1.2$ MPa, bajo succión constante de 0.8 MPa; la compresión isótropa se realizó por etapas (0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 y 1.2 MPa); cada una se mantuvo aproximadamente dos días (trayectoria A \Downarrow B, Fig. 5.13). Durante la etapa de corte (B \Downarrow C, Fig. 5.13) se mantuvo inalterada la succión y la presión neta de cámara ($(u_a - u_w) = 0.8$ MPa y $(\omega_b - u_a) = 1.2$ MPa) alcanzando la rotura para un valor de resistencia al corte de 2.88 MPa (punto de esfuerzo C, Fig. 5.13).

Con estos ensayos (IS-OC-03, IS-NC-06, IS-NC-12) se encontró la línea de estado crítico para un valor en particular de succión $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa, además de proporcionar otros parámetros empleados en el modelo elastoplástico propuesto por Alonso, *et al* (1990). En la Fig. 5.14, se presenta la evolución de estos ensayos en el espacio de esfuerzos (p, q, s).

En el ensayo (IS-OC-06), al término de la etapa de equilibrio se realizó una trayectoria de carga–descarga isótropa (trayectoria A \Downarrow B \Downarrow C, Fig. 5.15) bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa), proporcionando un estado sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar la etapa de corte (C \Downarrow D, Fig. 5.15). Los incrementos del esfuerzo medio neto se aplicaron en incrementos iguales ($\pm(\omega_n - u_a) = 0.2$ MPa) con el objeto de evitar cambios de succión hasta alcanzar un esfuerzo medio neto igual a $(\omega_n - u_a) = 1.6$ MPa (A \Downarrow B, Fig. 5.15). La descarga se realizó en escalones iguales de $\pm(\omega_n - u_a) = 0.2$ MPa hasta un valor de esfuerzo medio neto de 0.6 MPa (trayectoria B \Downarrow C, Fig. 5.15). Al igual que en los ensayos anteriores, la etapa de corte en el ensayo de compresión triaxial se llevó a cabo a una velocidad de deformación constante de 1 σ m/min, manteniendo constante la succión y la presión neta de cámara ($(u_a - u_w) = 0.8$ MPa y $(\omega_b - u_a) = 0.6$ MPa), hasta rotura ($q = 1.74$ MPa) (punto de esfuerzo D, Fig. 5.15).

Ensayos del grupo IWS

En este grupo, cada ensayo consistió en cuatro etapas: 1) etapa de equilibrio inicial; 2) etapa de compresión isótropa; 3) etapa de cambio de succión; y 4) etapa de aplicación del esfuerzo desviador. En esta serie de ensayos (IWS), se tomaron los mismos criterios de procedimiento que para la realización de las etapas 1, 2 y 4 de los ensayos (IS).

En el ensayo (IWS – OC – 01), se realizó un ciclo de humedecimiento–secado bajo esfuerzo medio neta constante $(\omega_n - u_a) = 0.6$ MPa al finalizar la etapa de compresión isótropa, generando un estado sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar la etapa de corte. La trayectoria de la carga isótropa se realizó en cuatro etapas hasta un estado de esfuerzo $(\omega_n - u_a) = 0.6$ MPa, bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa); en la Fig. 5.16 se muestra la correspondiente trayectoria de esfuerzo (A \Downarrow B). Después del proceso de carga isótropa, se realizó una trayectoria de humedecimiento–secado variando la succión matricial. Los valores de las etapas de succión en la trayectoria de humedecimiento fueron: 0.8, 0.1 y

0.01 MPa. Posteriormente, se impuso en la muestra una trayectoria de secado en una etapa hasta un valor de 0.8 MPa. En cada una se requirió alrededor de 10 días para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje. En la Fig. 5.16 se muestran las trayectorias de humedecimiento y secado de B↘ C y C↘ D respectivamente. Durante la etapa de corte (D↘ E, Fig. 5.16) se mantuvo constante la succión matricial y la presión neta de confinamiento ($(u_a - u_w) = 0.8$ MPa, y $(\omega_s - u_a) = 0.6$ MPa) hasta rotura (punto E, Fig. 5.16).

En la Fig. 5.17, aparece la trayectoria de esfuerzos seguida en el ensayo (IWS-NC-02); al finalizar la etapa de equilibrio, la muestra se sujetó a una trayectoria de carga isótropa hasta un valor de esfuerzo medio neto igual a $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa en cuatro etapas bajo una succión matricial constante de 0.8 MPa (trayectoria A↘ B, Fig. 5.17). Posteriormente, se continuó con una trayectoria de humedecimiento (B↘ C), siendo los valores de las etapas de cambio de succión: 0.8, 0.1 y 0.02 MPa; en cada una se requirieron 10 días para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje. En este ensayo, la etapa de compresión triaxial se inició a un valor de esfuerzo medio neto igual a $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa, y succión matricial de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa (punto de esfuerzo C, Fig. 5.17). Durante la etapa de corte se mantuvo constante la succión y la presión neta de cámara ($(u_a - u_w) = 0.02$, MPa y $(\omega_s - u_a) = 0.6$ MPa), hasta rotura ($q = 1.20$ MPa).

En la Fig. 5.19 está la trayectoria seguida en el ensayo (IWS-OC-87), donde a la muestra antes de ser montada en la célula triaxial se le impuso una succión total (Φ), aproximadamente de 87 MPa mediante su equilibrado con el aire de un ambiente cerrado cuya humedad relativa se controla con una disolución salina saturada de nitrato de magnesio hexahidratado ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), (Fig. 5.18). El movimiento de difusión del vapor es lento, y para alcanzar el equilibrio se necesita un tiempo mayor a tres semanas (en este caso se emplearon 30 días).

Una vez alcanzado el equilibrio entre la humedad relativa del aire en la atmósfera y la de la fase gaseosa del suelo después de los 30 días, se determinaron las propiedades físicas de la muestra (peso, contenido de agua y dimensiones); se prosiguió a su montaje en la célula triaxial imponiendo unas condiciones de esfuerzos iniciales: succión matricial de $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa; esfuerzo medio neto $(\omega_m - u_a) = 0.025$ MPa; y un pequeño desviador (q) de 10 kPa. En esta etapa dichas condiciones se mantuvieron durante 17 días aproximadamente, registrando los cambios de volumen de agua de la muestra para determinar su humedad y el tiempo de equilibrio en términos de deformación y drenaje (punto de esfuerzo A, Fig. 5.19). Al finalizar la segunda etapa de equilibrio, la muestra se sometió a una trayectoria de carga isótropa (A↘ B, Fig. 5.19) bajo succión matricial constante de 0.8 MPa; la presión de confinamiento se aumentó por etapas hasta un esfuerzo medio neto $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa, en etapas de carga isótropa (0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 MPa). Finalmente, se impuso la etapa de corte (B↘ C, Fig. 5.19) con la muestra sobreconsolidada por la retracción debida a la imposición de la succión total de 87 MPa. La compresión triaxial se realizó a succión y presión neta de cámara constante ($(u_a - u_w) = 0.8$ MPa y $(\omega_s - u_a) = 0.6$ MPa), bajo una velocidad de deformación constante igual a $1.0 \sigma_m/\text{min}$, hasta rotura (punto de esfuerzo C, Fig. 5.19).

La Tabla 5.11 contiene un resumen de las principales características de las trayectorias de esfuerzos, en la que se invirtió un periodo de alrededor de 290 días de trabajo en la célula triaxial con control de succión. Los primeros ensayos, cuyos resultados no fueron fiables y han sido desechados, sirvieron para corregir algunos defectos del equipo: fundamentalmente la modificación del sistema de la imposición del esfuerzo axial, y la adición de las piezas acopladas al transductor de carga. Algunos

problemas posteriores, sin embargo, como la rotura de algunas piezas, caída de tensión esporádica o la medida incorrecta de determinados parámetros, hicieron que se tuviera 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 determinada trayectoria de esfuerzos, como ya se mencionó.

Tabla 5.11 Programa experimental de ensayos de compresión triaxial en muestras no saturadas. Célula triaxial con control de succión.

Identificación del ensayo	Trayectoria de esfuerzos	Descripción, $h/r=4$, $s = (u_a - u_w)$, $p = (\omega_m - u_a)$, $p_r = (\omega_3 - u_a)$,	Periodo (días)
IS-OC-03	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	3
	b) carga isotrópica	2 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 0.3 \text{ MPa}$	4
	c) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_r = 0.3 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 1.19 \text{ MPa}$	13
IS-NC-06	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	4
	b) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 0.6 \text{ MPa}$	13
	c) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_r = 0.6 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 1.76 \text{ MPa}$	14
IS-NC-12	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	3
	b) carga isotrópica	7 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 1.2 \text{ MPa}$	15
	c) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_r = 1.2 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 2.88 \text{ MPa}$	14
IS-OC-06	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	3
	b) carga isotrópica	9 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 1.6 \text{ MPa}$	16
	c) descarga	4 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\min} = 0.6 \text{ MPa}$	10
	d) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_r = 0.6 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 1.74 \text{ MPa}$	11
IWS-OC-87	a) equilibrio	$\Phi \# 87 \text{ MPa}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \#$	30
	b) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	17
	c) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 0.6 \text{ MPa}$	8
	d) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_r = 0.6 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 1.65 \text{ MPa}$	13
IWS-OC-01	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	3
	b) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 0.6 \text{ MPa}$	8
	c) mojado	2 etapas a $p = 0.6 \text{ MPa}$, $s_{\min} = 0.01 \text{ MPa}$	20
	d) secado	1 etapa a $p = 0.6 \text{ MPa}$, $s_{\max} = 0.8 \text{ MPa}$	6
	e) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_r = 0.6 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 1.83 \text{ MPa}$	15
IWS-NC-02	a) equilibrio	$s = 0.8 \text{ MPa}$, $p = 0.025 \text{ MPa}$	3
	b) carga isotrópica	4 etapas a $s = 0.8 \text{ MPa}$, $p_{\max} = 0.6 \text{ MPa}$	8
	c) mojado	2 etapas a $p = 0.6 \text{ MPa}$, $s_{\min} = 0.02 \text{ MPa}$	20
	d) corte ($v_q = \text{cte}$)	$s = 0.02 \text{ MPa}$, $p_r = 0.6 \text{ MPa}$, $q_{\max} = 1.20 \text{ MPa}$	12

V_q : velocidad de deformación constante = $1.0 \text{ } \sigma\text{m}/\text{min}$; p_r : presión neta de cámara constante de corte.

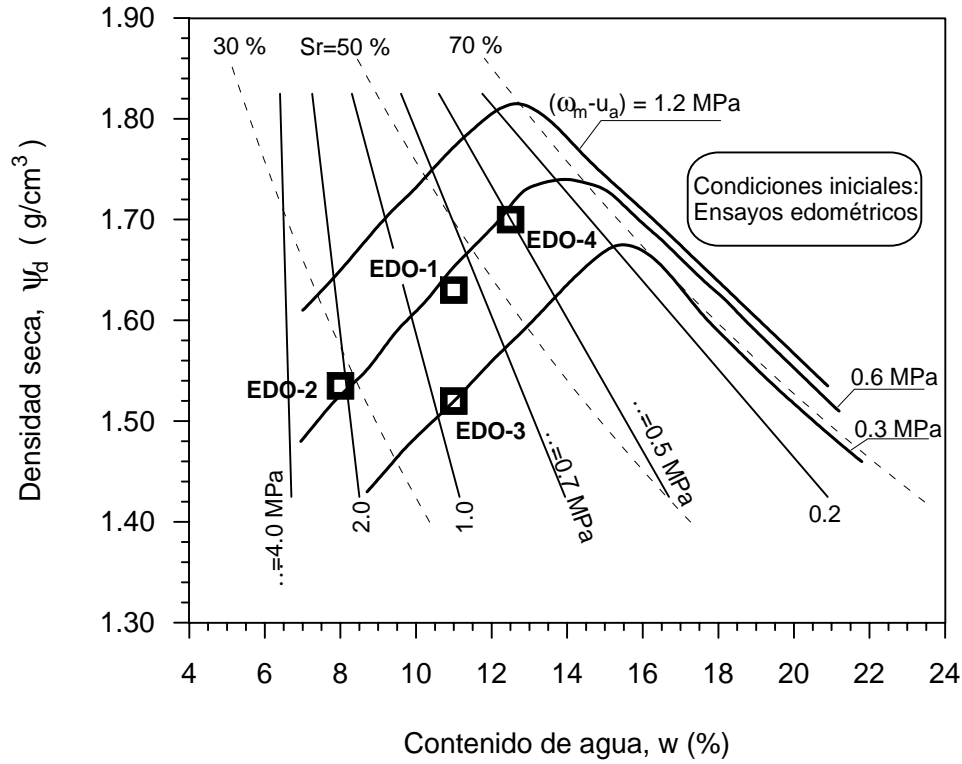


Figura 5.1 Condiciones iniciales de los ensayos edométricos con control de succión. Nueva célula edométrica con control de succión.

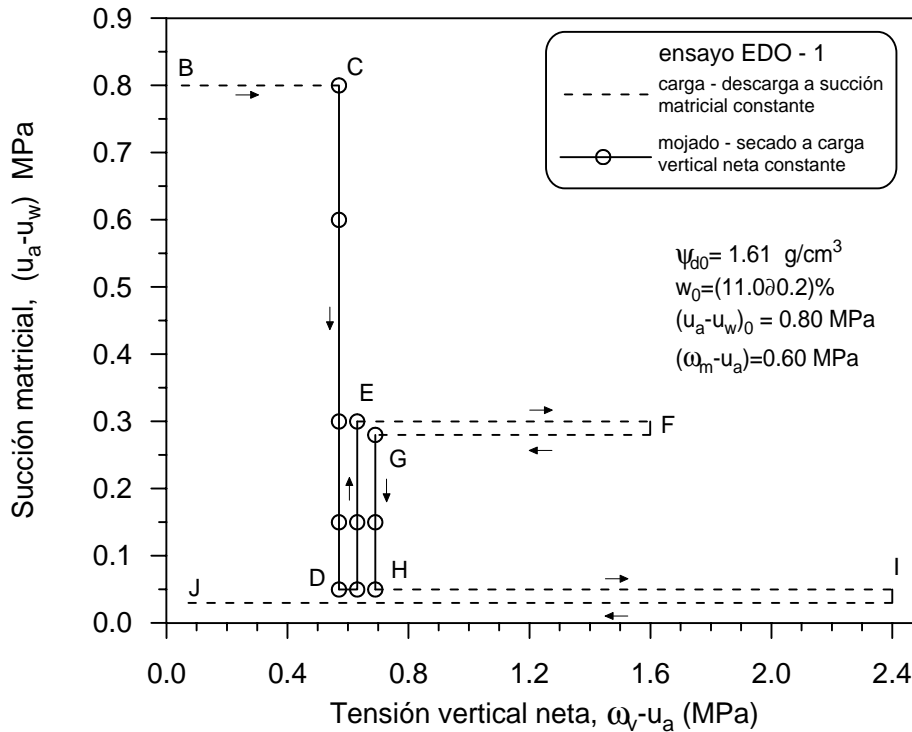


Figura 5.2 Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-1.

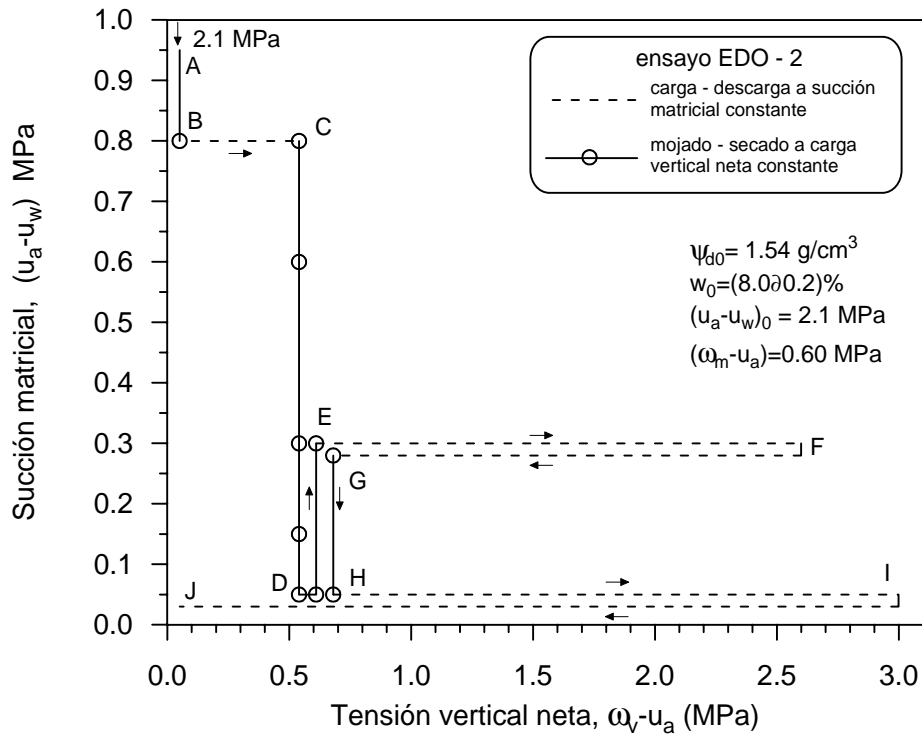


Figura 5.3 Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-2.

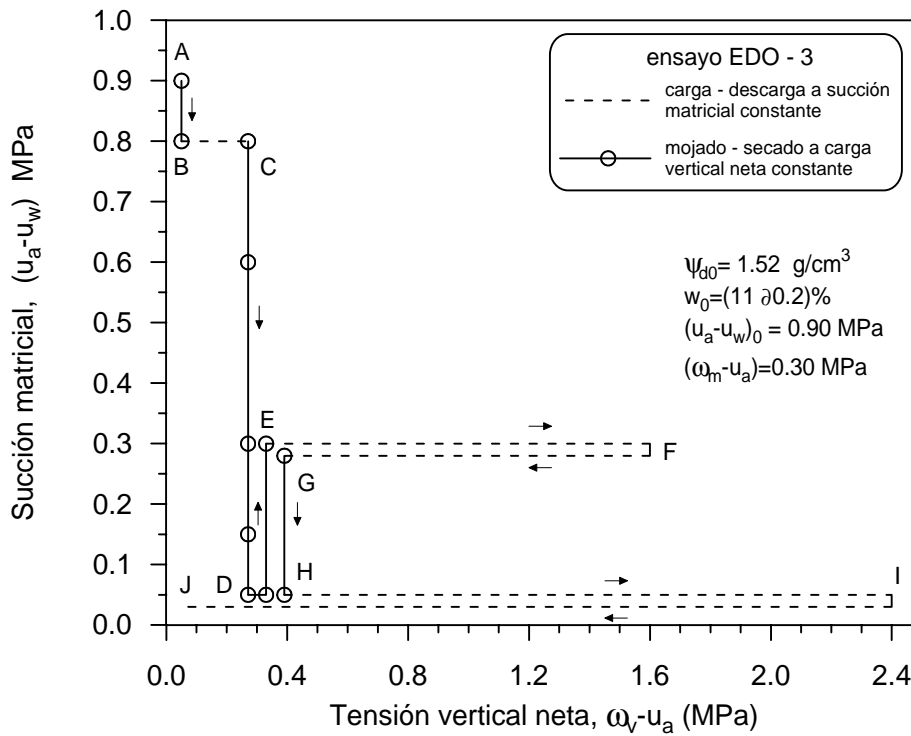


Figura 5.4 Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-3.

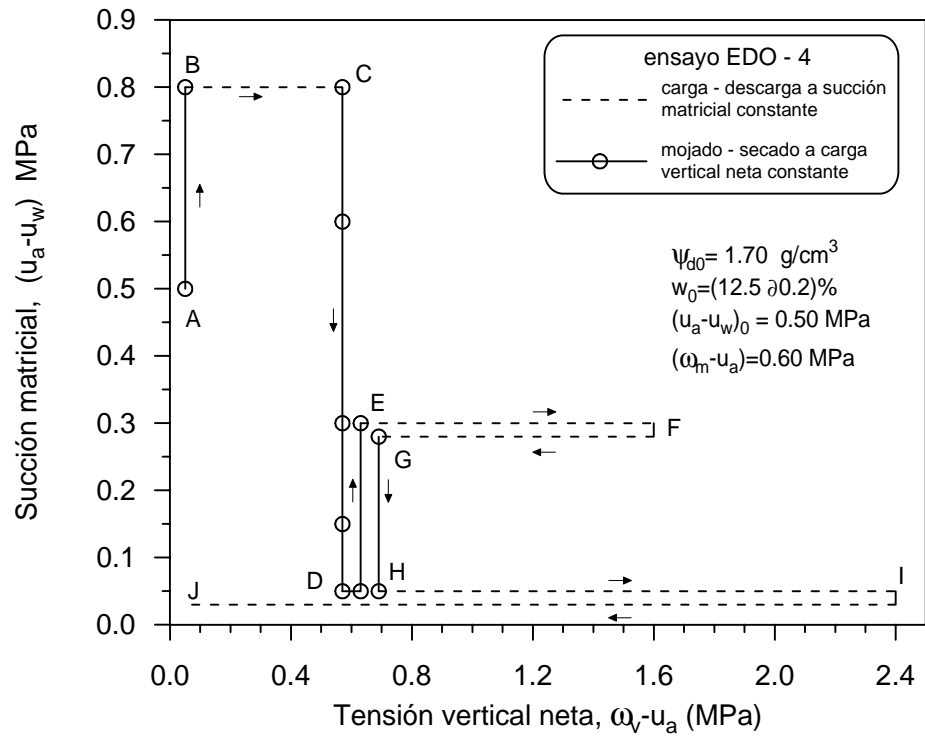


Figura 5.5 Trayectoria de esfuerzos realizada en el ensayo edométrico EDO-4.

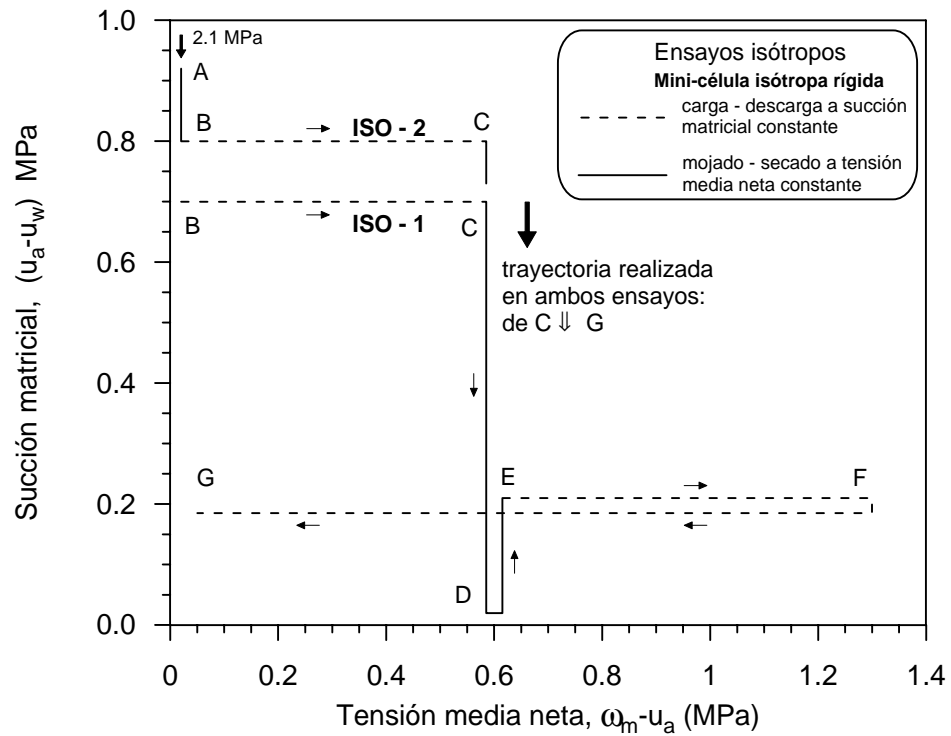


Figura 5.6 Trayectoria de esfuerzos. Ensayos isotrópicos ISO-1 y ISO-2 (mini-célula isotrópica rígida).

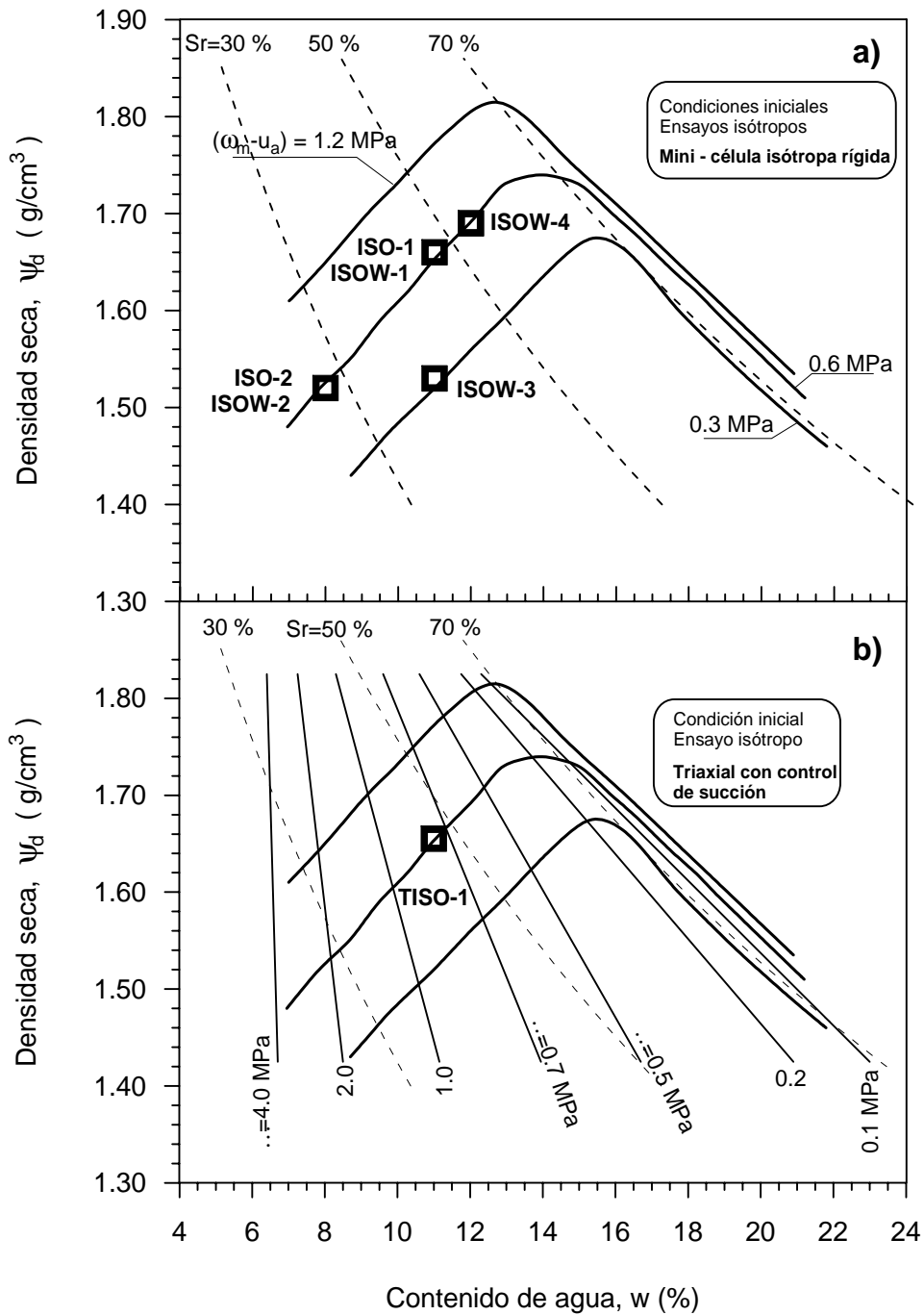


Figura 5.7 Condiciones iniciales de las probetas fabricadas de los ensayos: **a)** isotrópos realizados en la mini-célula isotropa rígida; **b)** ensayos isotrópos realizados con el equipo triaxial con control de succión. Curvas de compactación estática en condiciones isotrópas con contornos de igual succión.

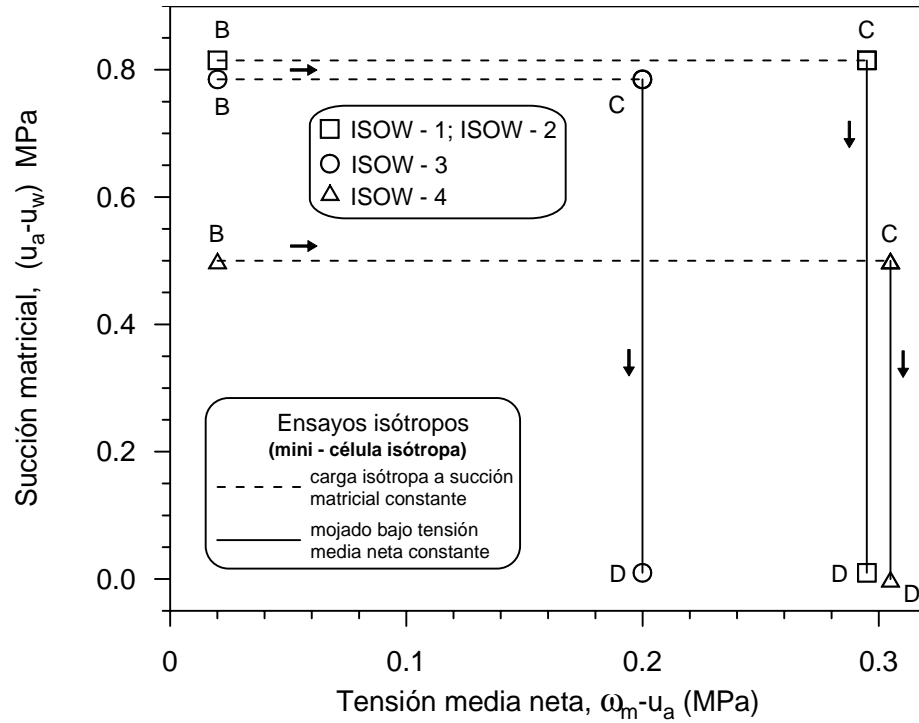


Figura 5.8 Trayectorias de esfuerzos de los ensayos isotropos ISOW (mini-célula isotrópica rígida). ($r = 10$ mm, $h = 20$ mm: $h/r = 2$).

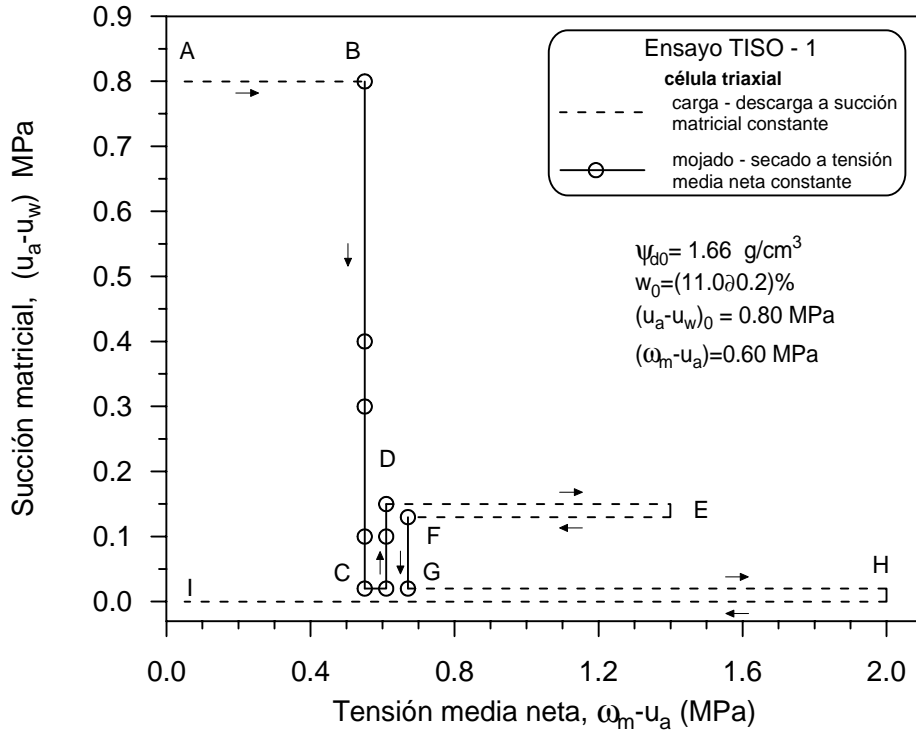


Figura 5.9 Trayectoria de esfuerzos. Ensayo isotrópico realizado en la célula triaxial con control de succión. ($r = 19$ mm, $h = 76$: $h/r = 4$).

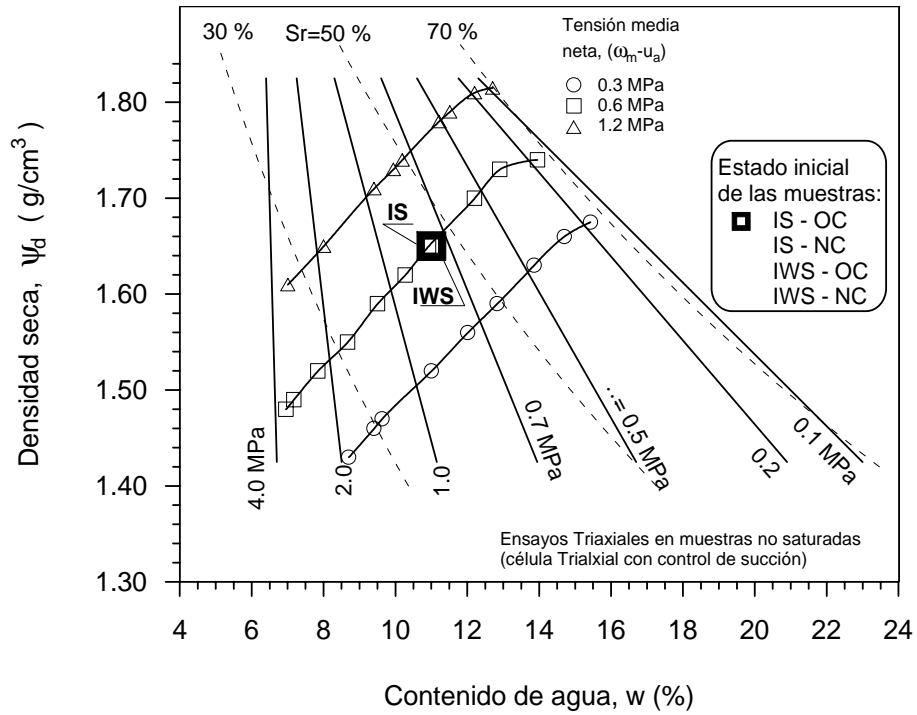


Figura 5.10 Estado inicial de las muestras para los dos grupos de ensayos de compresión triaxial a variación de deformación constante ($v_q = 1 \text{ } \sigma\text{m/min}$) en *muestras no saturadas* (IS, IWS) realizados en la célula triaxial con control de succión.

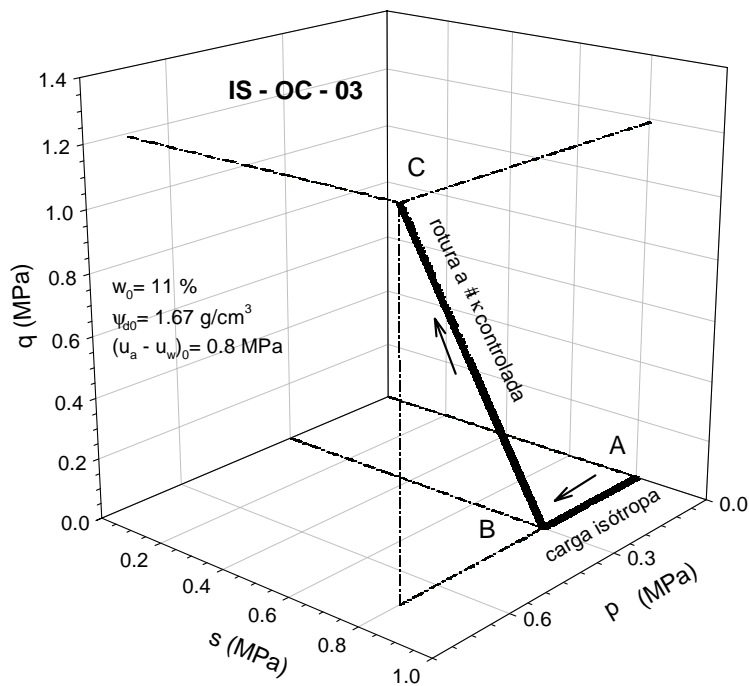


Figura 5.11 Trayectoria de esfuerzo del ensayo (IS-OC-03) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \text{ } \sigma\text{m/min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3 - u_a = 0.3 \text{ MPa}$).

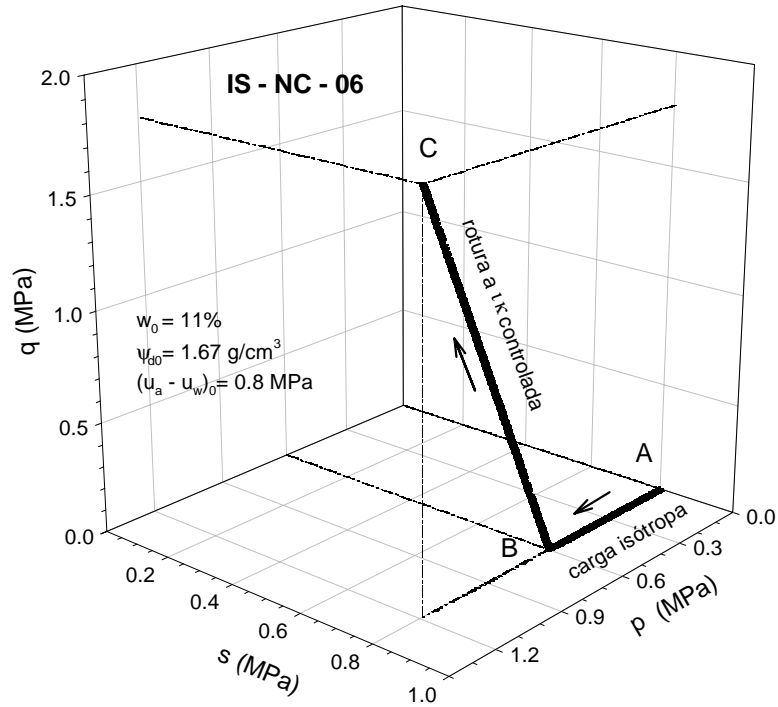


Figura 5.12 Trayectoria de esfuerzo del ensayo (IS-NC-06) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \text{ } \sigma\text{m/min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3 - u_a = 0.6 \text{ MPa}$).

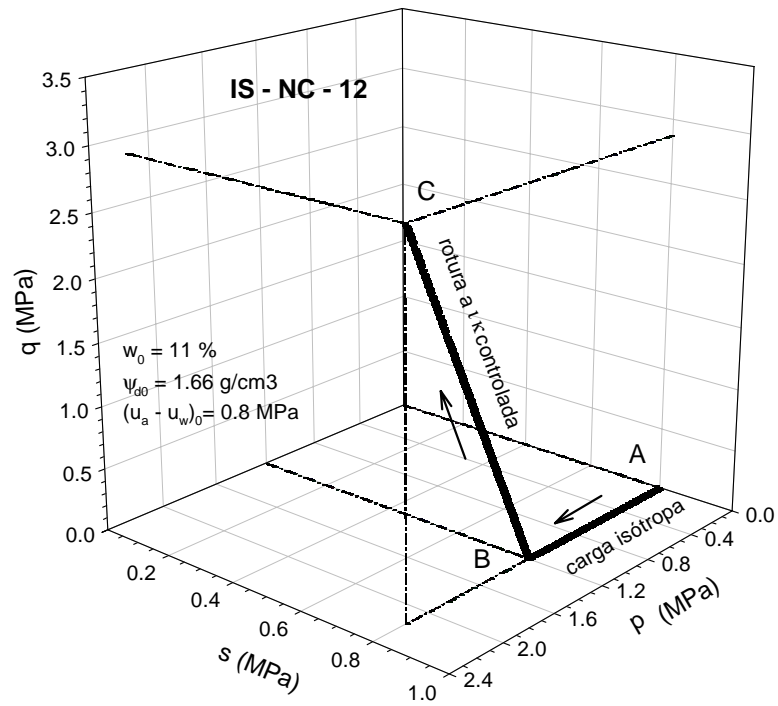


Figura 5.13 Trayectoria de esfuerzo del ensayo (IS-NC-12) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \text{ } \sigma\text{m/min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3 - u_a = 1.2 \text{ MPa}$).

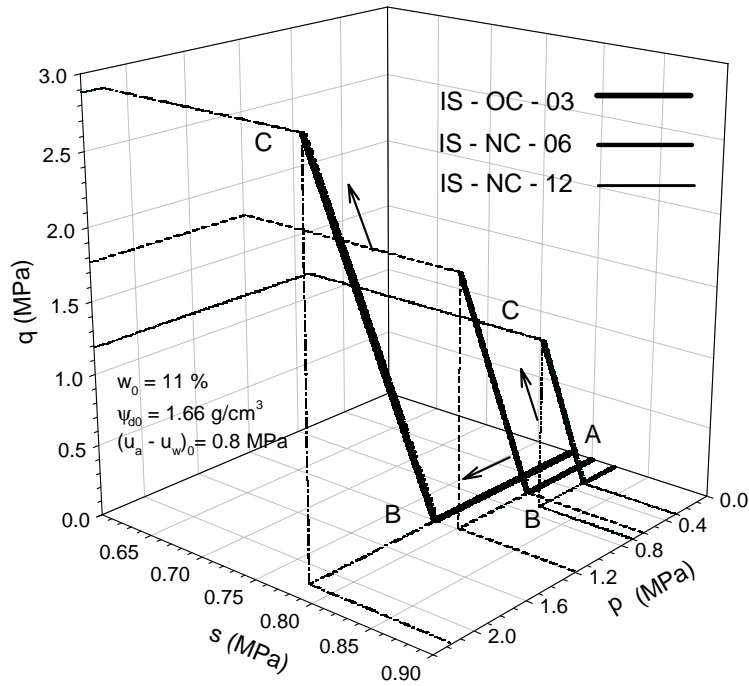


Figura 5.14 Evolución de los ensayos para la determinación de la línea de estado crítico, para un valor en particular de succión ($u_a - u_w$) = 0.8 MPa.

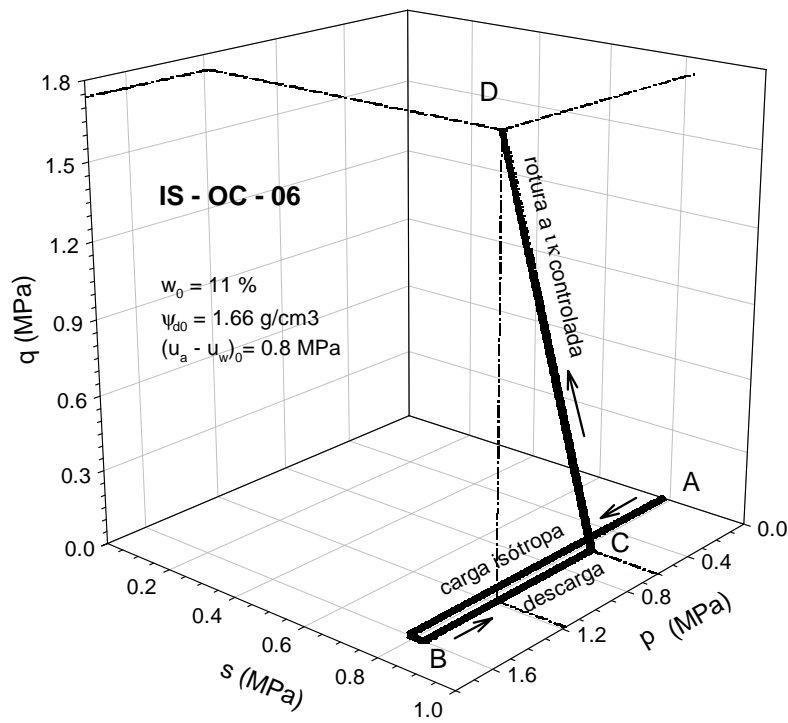


Figura 5.15 Trayectoria de esfuerzos del ensayo (IS-OC-06) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \text{ cm/min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3 - u_a = 06 \text{ MPa}$).

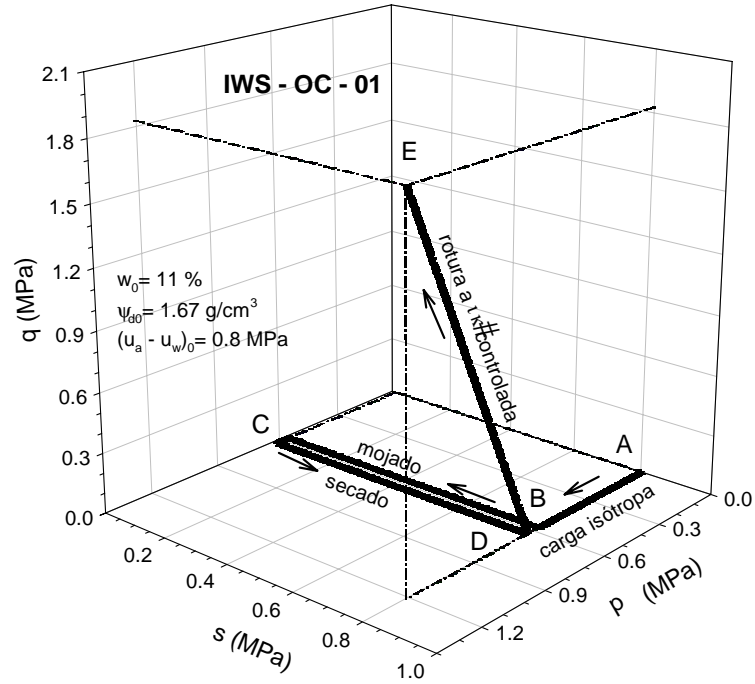


Figura 5.16 Trayectoria de esfuerzos para el ensayo IWS-OC-01 ($v_q = 1 \text{ } \sigma\text{m/min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3 - u_a = 06 \text{ MPa}$).

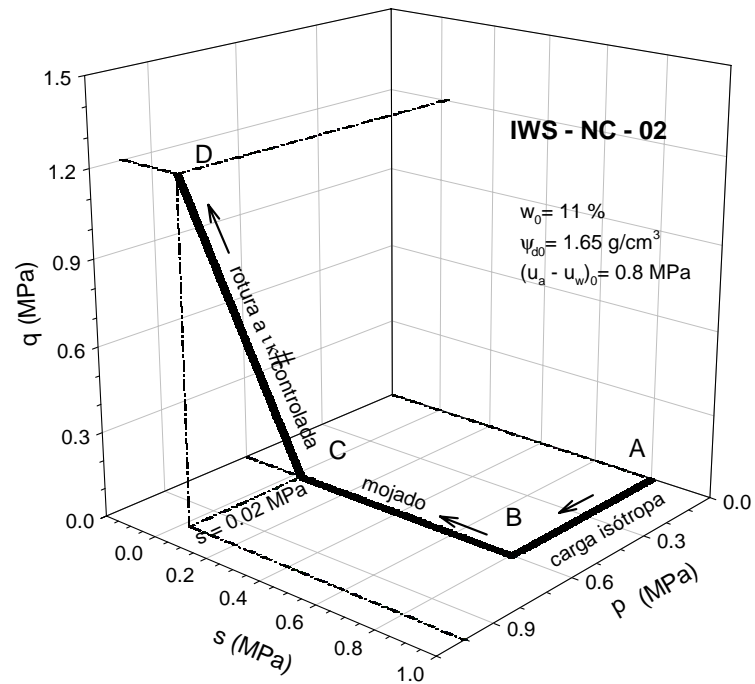


Figura 5.17 Trayectoria de esfuerzos para el ensayo IWS-NC-02 ($v_q = 1 \text{ } \sigma\text{m/min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\omega_3 - u_a = 06 \text{ MPa}$).



a)



b)

Figura 5.18 Transferencia de vapor asociada a la succión total ($\Phi=87$ MPa), con una disolución salina saturada $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$; a) probetas preparadas para el ensayo IWS-OC-87; b) probetas bajo atmósfera y humedad relativa, impuestas por el procedimiento básico de difusión.

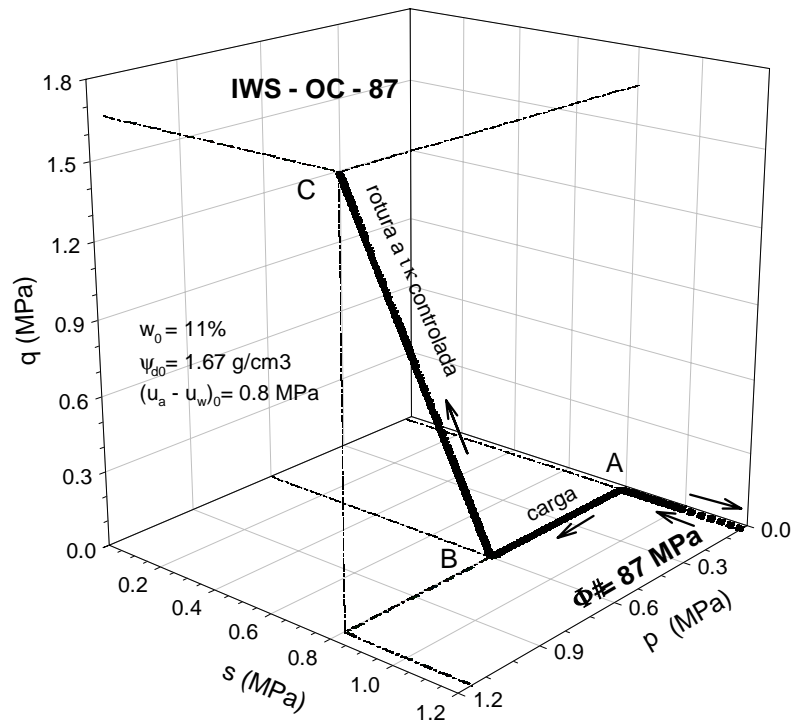


Figura 5.19 Trayectoria de esfuerzos del ensayo de compresión triaxial (IWS-OC-87). Succión total ($\Phi = 87 \text{ MPa}$ por transferencia de vapor (disolución salina saturada $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Resultados edométricos con control de succión

6.1.1 Introducción

En esta sección se presentan y se analizan los resultados experimentales del programa de investigación desarrollado en la nueva célula edométrica con control de succión, cuyas características se describieron en el Capítulo 3. Su objetivo ha sido estudiar los cambios de volumen en una arcilla de baja plasticidad no saturada. Se trató de aplicar trayectorias de esfuerzos en las que el suelo en una primera etapa es sometido a humedecimiento hasta alcanzar una succión muy baja. Posteriormente, se procedió a la desaturación de la muestra manteniendo constante en toda la etapa el esfuerzo vertical neto. En la segunda etapa consistió con un ciclo de carga–descarga del esfuerzo conservando en forma constante la succión matricial. En una tercera etapa, se redujo la succión y bajo esta condición de la succión matricial se realizó un ciclo de carga–descarga final.

Este programa de ensayos ha servido para los siguientes fines:

- ∉ Influencia del estado inicial (densidad seca (porosidad), y grado de saturación) en el comportamiento volumétrico
- ∉ Efecto de los esfuerzos aplicados en el comportamiento volumétrico
- ∉ Efecto de los cambios de succión en el comportamiento volumétrico

6.1.2 Aspectos generales de las variables del estado tensional

El comportamiento de la arcilla se analizó a través de dos variables independientes de estado tensional: el esfuerzo neto $(\omega_{ij} - u_a)\tau_{ij}$ y la succión matricial $(u_a - u_w)\tau_{ij}$, donde ω_{ij} es el esfuerzo total, mientras que u_a y u_w corresponden a la presión de la fase gaseosa y líquida respectivamente (Bishop y Blight, 1963; Matyas y Radhakrishna, 1968; Fredlund y Morgenstern, 1977).

En esta memoria, la relación de humedad (definida como la relación entre el volumen de agua al volumen de sólidos) $-te_w = G_s / \rho_w$ se seleccionó como una variable de estado volumétrico asociada con la succión matricial, de la misma manera que la variable de estado volumétrico, la relación de vacíos $-te$, es la asociada con la variable del esfuerzo neto. Se completó diagramas de trayectorias de esfuerzos convencionales en el plano $(u_a - u_w)$ vs $(\omega_m - u_a)$, y diagramas de compresión en el plano e vs $(\omega_m - u_a)$ son complementados con los gráficos de curvas de retención en el plano $(u_a - u_w)$ vs e , y gráficos de variables de estado volumétrico en el plano e vs e_w .

Romero y Vaunat (2000) utilizaron los mismos planos para representar el comportamiento de un suelo bajo condiciones edométricas e isotropas. La ventaja de usar la variable de estado volumétrico e_w es que tiende a la relación de vacíos, e , bajo un estado muy cercano al saturado ($S_r = e_w/e \downarrow 1$). Los cambios de e_w se estiman directamente en laboratorio, midiendo el volumen de agua que entra o sale en la muestra de suelo si se conoce el volumen de sólidos.

La variable de estado volumétrico e_w se ha empleado en diferentes contextos por diversos autores en suelos no saturados. Toll (1995) describió un modelo conceptual para trayectorias de secado y humedecimiento usando e_w para representar el contenido de agua de un suelo no saturado sobre el mismo diagrama que la relación de vacíos. Prashanth *et al.* (1998) lo llamó relación de vacíos de agua o contenido del volumen de agua. Estos autores lo aplicaron en conjunción con la relación de vacíos para describir las curvas de compactación. Por otro lado, Wheeler (1996) usó el volumen de agua específico ($\tau_w = 1 + G_s w = 1 + e_w$) y el volumen específico ($\tau = 1 + e$), como variables de estado volumétrico que describe el comportamiento de un suelo no saturado.

6.1.3 Resultados de los ensayos edométricos

6.1.3.1 Ensayo EDO - 1

En la Fig. 6.1 se presentan los resultados del ensayo edométrico sobre la arcilla de baja plasticidad en estudio, presentando las siguientes condiciones iniciales (punto B): $e_0 = 0.68$; $e_{w0} = 0.29$; $(e_w/e)_0 = 0.43$ y $(u_a - u_w)_0 = 0.8$ MPa. El máximo esfuerzo de fabricación de la probeta fue de $(\sigma_n - u_a) = 0.6$ MPa, de acuerdo con el apartado 4.3.2 (compactación estática en condiciones isotropas: esfuerzo controlado); y en la Fig. 5.1 las condiciones iniciales en el plano Próctor. Los ensayos se realizaron con la célula edométrica descrita en 3.5.2.

El gráfico de la curva de retención para este suelo (ver diagrama arriba-izquierda, Fig. 6.1) se completó con el gráfico de la trayectoria de esfuerzo (diagrama arriba-derecha), el plano de las variables de estado volumétricos (diagrama abajo-izquierda), y el plano de compresión vertical (diagrama abajo-derecha). Casi todos los diagramas se usan en las representaciones convencionales de la mecánica de suelos no saturados, excepto el plano de las variables de estado volumétrico. Este diagrama es equivalente a la representación convencional de las curvas de compactación (densidad seca vs contenido de agua gravimétrico), donde las líneas discontinuas indican los contornos con igual grado de saturación. La combinación de representar datos experimentales en este plano permite interpretar los resultados de la curva de retención en un contexto más amplio del acoplamiento hidromecánico. Romero y Vaunat (2000), proponen referirse a este tipo de gráfico como SWEP: S por la succión matricial; W por la relación de agua; E por la relación de vacíos, y P por el esfuerzo aplicado.

La trayectoria de esfuerzo seguida de B a J se resume de la siguiente manera (descrita con detalle en el subcapítulo 5.2). Después de aplicar la trayectoria de carga vertical hasta un valor de esfuerzo vertical neto de $(\sigma_n - u_a) = 0.6$ MPa (B \Downarrow C), bajo succión constante de $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa, se prosiguió con un ciclo de humedecimiento-secado (C \Downarrow E) bajo un esfuerzo vertical neto constante $(\sigma_n - u_a) = 0.6$ MPa, que se realizó manteniendo la presión de aire constante a un valor de $u_a = 0.9$ MPa, y controlando la presión de agua (u_w). La trayectoria de humedecimiento se realizó por etapas hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.05$ MPa (punto D). Después la muestra se sometió a una trayectoria de secado hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.3$ MPa (punto E); y posteriormente, a una trayectoria de carga (E \Downarrow F) y descarga (F \Downarrow G) bajo succión constante $(u_a - u_w) = 0.3$ MPa. Enseguida, se prosiguió con una trayectoria de humedecimiento hasta un valor de succión de $(u_a - u_w) = 0.05$ MPa (punto H), y finalmente, se repitió una trayectoria de carga (H \Downarrow I) y descarga (I \Downarrow J) a succión constante $(u_a - u_w) = 0.05$ MPa.

En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.1), se observa que en el proceso de humedecimiento ($C \Downarrow D$) se desarrollan importantes cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de la variable de estado volumétrico ($(1e/1e_w - 0.65)$) cruza casi perpendicularmente a las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$). Estos importantes cambios de grado de saturación están asociados con la ocurrencia de un proceso irrecuperable de compresión volumétrica, debido principalmente al colapso del esqueleto del suelo. Esta forma del incremento en el grado de saturación puede relacionarse con el desplazamiento de la superficie LC (loading-collapse) definido por Alonso, *et al* (1990) en un proceso de humedecimiento, el cual se asocia con un colapso irreversible de la macroestructura y del llenado de los macroporos. El proceso de endurecimiento de la macroestructura induce una densificación de la macroestructura obteniendo un valor de entrada de aire mayor. En la trayectoria de secado ($D \Downarrow E$), se observa una respuesta rígida, asociada con cambios pequeños en agua y en la relación de vacíos. No obstante, en esta trayectoria de incremento de succión, es más fácil expulsar agua que la inducida por la deformación del esqueleto.

En la Fig. 6.2 se muestran los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a los cambios de succión matricial ($s = u_a - u_w$). Se han detectado deformaciones de colapso poco importantes en las primeras etapas de humedecimiento, concentrándose en la última etapa de mojado la deformación de colapso (valores de succión menores de 0.15 MPa). Esta trayectoria de humedecimiento ($C \Downarrow D$) ocasiona un desplazamiento de la superficie LC, induciendo cambios en la estructura del suelo que afectará a los siguientes procesos. En la etapa de secado ($D \Downarrow E$) se observa una pequeña retracción de 0.21 %. Por otro lado, en la trayectoria de humedecimiento ($G \Downarrow H$) se encontró una expansión de 0.08 %.

Por su parte, en la Fig. 6.3 se hace referencia a la evolución temporal de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) en la trayectoria de humedecimiento ($C \Downarrow D$), para cada una de las etapas de equilibrado bajo un esfuerzo vertical neto constante de $(\omega_v - u_a) = 0.6$ MPa. Se observa que no se presentan cambios significativos tanto en la deformación volumétrica (κ_v) como en los contenidos de agua hasta valores menores de succión de 0.15 MPa. En cada etapa se requirió alrededor de 5 días para alcanzar el estado de equilibrio en términos de deformación y drenaje.

La Fig. 6.4 se corresponde los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios de esfuerzo vertical neto $(\omega_v - u_a)$. Estos ensayos se llevaron a cabo en la modalidad de control de carga, la cual se aplicó por incrementos, con un intervalo aproximado de 48 horas entre incrementos sucesivos. En las figuras 6.5 y 6.6, se observa cómo se alcanza el equilibrio en deformación, bajo una carga constante.

En las trayectorias de carga a succión constante ($u_a - u_w$) (trayectorias $E \Downarrow F$ y $H \Downarrow I$), es de esperar una reducción del volumen de vacíos como consecuencia del incremento del esfuerzo neto aplicado $(\omega_v - u_a)$. Este fenómeno implicaría un aumento del grado de saturación ($S_r = e_w/e$), pero debido a la expulsión de agua (como se observa en las Fig. 6.4 y 6.5) el grado de saturación permanece prácticamente constante. En la Fig. 6.1 (abajo-izquierda) se observa en las trayectorias de carga ($E \Downarrow F$ y $H \Downarrow I$) una tendencia paralela a las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$).

La Fig. 6.6 presenta la evolución temporal de las deformaciones recuperables, contenidos de agua y grados de saturación para las diferentes etapas de la trayectoria de la descarga vertical neta ($F \Downarrow G$),

donde aparece una recuperación elástica del $\kappa_v = -0.18\%$, manteniendo un contenido de agua y grado de saturación prácticamente constantes.

En la Fig. 6.7, se muestra el comportamiento mecánico en el plano e vs $\omega_v - u_a$ de los ciclos de carga-descarga (E↘ F↘ G y H↘ I↘ J), bajo succión matricial constante de 0.3 MPa y de 0.05 MPa respectivamente. El comportamiento hidráulico, también se representa en el mismo gráfico en la trayectoria de humedecimiento y secado (C↘ D ↘ E) en los planos e , e_w vs $u_a - u_w$. Se pretende analizar en forma cualitativa el movimiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_v - u_a)$ (figura superior, Fig. 6.7). Para ello se consideraron los mismos parámetros del modelo propuesto por Alonso, *et al* (1990), indicados en el Capítulo 4, y que se obtuvieron previamente a partir de los ensayos de compresión isótropa saturada y los ensayos de colapso sin control de succión. Estos parámetros se indican en la Tabla 6.1. En la Fig. 6.7 se muestra la forma adoptada de la curva LC inicial y su desplazamiento, debido a una disminución en la succión y al incremento del esfuerzo vertical neto (LC final).

Tabla 6.1 Parámetros del modelo utilizados en el análisis de los ensayos edométricos.

# ζ (0)	## ρ	### η # (1/MPa)	R	p^c (kPa)
0.073	0.011	3	0.8	2

Se han utilizado estos parámetros ya que con ellos se obtuvieron unas superficies de fluencia en las que se han ajustado bien los puntos de paso del comportamiento elástico a elastoplástico medido en los ensayos. Hay que tener presente que el modelo está formulado en términos de esfuerzos medios ($\omega_n - u_a$), y que en los ensayos edométricos se ha utilizado esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$). Por tanto, la representación de la superficie LC es sólo cualitativa.

Se determinaron los parámetros asociados a la deformabilidad del suelo en un estado no saturado bajo condiciones edométricas. En las trayectorias de carga y descarga del esfuerzo vertical neto, se observa una zona antes y después del punto de fluencia que se puede obtener por la intersección de la extrapolación lineal de ambas zonas. Los parámetros ρ (bajo condiciones isótropas, en el plano $v : \ln p$) o ρ_{edo} (bajo condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\omega_v - u_a)$) representan la compresibilidad en el rango elástico, y $\zeta(s) = -1v/1 \ln p$ o $\zeta_{edo}(s) = -1v/1 \ln(\omega_v - u_a)$, el equivalente a los parámetros de compresibilidad en el rango elastoplástico. En la Fig. 6.7 se indican los valores de los parámetros de compresibilidad en términos de esfuerzo vertical neto. En la trayectoria de carga bajo una succión constante mayor, se presentó una respuesta más rígida ($\zeta_{edo}(0.3) = 0.084$, $\zeta_{edo}(0.05) = 0.12$). En el caso de la descarga, en ambas condiciones de succión matricial, el parámetro de compresibilidad de la zona elástica resultó con el mismo valor ($\rho_{edo} = 0.002$).

El esfuerzo de preconsolidación p_0 (condiciones isótropas, en el plano $v : \ln p$), o ω_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\omega_v - u_a)$), determinada por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, se presenta en el plano $s : \omega_v - u_a$. Se observa cómo se modifica la superficie de fluencia (LC). Una vez que en la trayectoria de carga (E↘ F) alcanza el punto ω_{v01} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie LC se lleva al punto de esfuerzo final de la trayectoria (E↘ F).

En el caso de la trayectoria de carga (H↓ I) las deformaciones irreversibles comenzarán después de alcanzar el punto de esfuerzo ω_{v02} , moviendo la superficie de fluencia a la posición final (LC final H↓ I) (Fig. 6.7).

En las trayectorias de humedecimiento (C↓ D) y secado (D↓ E), presentadas en el espacio e vs u_a-u_w y e_w vs. u_a-u_w (Fig. 6.7), se observa que en las primeras etapas de reducción de la succión, no presenta valores significativos de entrada de agua en la muestra; mientras que en la última etapa de humedecimiento hay una entrada de agua muy importante, generando el 80 % de la deformación de colapso medido y repercutiendo en un movimiento de la superficie de fluencia inicial. En la trayectoria de secado (D↓ E), se obtiene el parámetro de rigidez elástica de $\rho_{sedo} = 0.002$.

6.1.3.2 Ensayo EDO – 2

En la Fig. 6.8, se presentan los resultados edométricos del ensayo EDO-2 en un gráfico SWEP. Las condiciones iniciales (punto A) después de la compactación isótropa son: $e_0 = 0.74$; $e_{w0} = 0.211$; $\Phi_0 = 2.1$ MPa y $(e_w/e)_0 = 0.28$, y el esfuerzo máxima de fabricación (ω_m-u_a) = 0.6 MPa. En la Fig. 5.1 se muestran las condiciones iniciales en el plano Próctor.

Las trayectorias de esfuerzos realizadas de A a J, fueron semejantes a las del ensayo descrito en el párrafo anterior (ver sección 5.2). A partir de una succión inicial total $\Phi_0 = 2.1$ MPa (determinada con la técnica psicrométrica) (punto A, Fig. 6.8) la muestra se sometió a un proceso de equilibrado a una succión matricial de $(u_a-u_w) = 0.8$, MPa bajo una carga de 0.05 MPa; esto repercutió en un ligero aumento de volumen ($\kappa_v = 0.30\%$) (punto B, Fig. 6.8).

En el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.8), se observa en el proceso de humedecimiento (C↓ D) un aumento en el grado de saturación, en donde la trayectoria de la variable de estado volumétrico ($v_e/v_{e_w} - 1.2$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$), alcanzando un valor por encima del 80 %. Este fenómeno se asocia, principalmente al colapso del esqueleto del suelo.

En la Fig. 6.9 se muestran los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a los cambios de succión matricial ($s = u_a-u_w$). Las deformaciones de colapso se generan desde las primeras etapas de humedecimiento (C↓ D). Este comportamiento se debe a que la muestra se ha preparado con una estructura menos densa (Tabla 6.2) que la del ensayo EDO-1, lo que favorece el colapso.

La Fig. 6.10 presenta la evolución temporal de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) de la trayectoria de humedecimiento (C↓ D), bajo una misma carga vertical neta constante de $(\omega_v-u_a) = 0.6$ MPa, en tanto que la Fig. 6.11 los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios en el esfuerzo vertical neto (ω_v-u_a), en donde el proceso de colapso, hace tender al suelo a un estado casi saturado, densificando la macroestructura, con un valor de entrada de aire mayor y rigidizando la respuesta del suelo en las etapas posteriores. La deformación en esta etapa fue de 11.2 %, lo cual corrobora, el hecho de que un suelo experimenta un colapso importante al aumentar su grado de saturación cuando posee

una estructura muy abierta. En la trayectoria de secado (D↘ E) también se observa una ligera retracción elástica ($\kappa_v = 0.22\%$), mientras que en la trayectoria de mojado (G↘ H) se manifiesta en una recuperación elástica ($\kappa_v = 0.13\%$).

Este ensayo edométrico no fue del todo satisfactorio para reproducir movimientos de la superficie de fluencia, LC, en el plano $u_a - u_w$ vs $\omega_v - u_a$, ante la incertidumbre para definir los valores del esfuerzo de preconsolidación ω_{v0} (Fig. 6.12). Debido a que el pistón que transmite la carga vertical neta a la muestra alcanzó su desplazamiento límite (Nos 7 y 8, Fig. 3.10), originado por las deformaciones volumétricas acumuladas hasta el punto de esfuerzo (E) más las deformaciones de las primeras etapas de la trayectoria de carga (E↘ F).

La solución inmediata que se tomó fue descargar la muestra totalmente, cerrando la válvula que conecta el sistema de presión de agua a la muestra, y evitar la pérdida de agua del suelo durante el proceso de la descarga vertical neta. Posteriormente se redujo la presión de aire (u_a) y la presión de cámara (ω_v) simultáneamente, hasta obtener una presión neta nula en la muestra. Una vez retirado el cuerpo superior que conforma el equipo edométrico, se retiró el pistón de carga (Figs. 3.8 y 3.10) para colocar una piedra porosa anular muy permeable de 3 mm de altura sobre la muestra. Después se ubicó el pistón de carga sobre la piedra porosa (No 12, Fig. 3.10), prosiguiendo con el montaje del cuerpo superior del edómetro.

Una vez realizado el montaje, se incrementó simultáneamente la presión de aire (u_a) y cámara (ω_v), así como la presión de agua (u_w), hasta alcanzar las condiciones del punto de esfuerzo (E) ($u_a - u_w = 0.3$ MPa y $\omega_v - u_a = 0.6$ MPa), manteniéndolas durante diez días, para garantizar las condiciones impuestas, antes de comenzar la trayectoria de carga E↘ F, registrando lecturas de tiempo–desplazamiento, y tiempo–cambio de contenido de agua.

En la Fig. 6.12, se presenta el comportamiento mecánico de los ciclos de carga-descarga (E↘ F↘ G y H↘ I↘ J), el comportamiento hidráulico de la trayectoria de humedecimiento-secado (C↘ D↘ E), y en el espacio ($u_a - u_w$, $\omega_v - u_a$) se analiza en forma cualitativa el movimiento de la superficie LC, considerando los parámetros ($\zeta(0)$, $\rho_{3\eta}$ y p^c) de la Tabla 6.1. En la Fig. 6.12, en el espacio $e : \omega_v - u_a$, se muestran los valores de los parámetros de compresibilidad en términos de esfuerzo vertical neto, lo que hace que el suelo una respuesta más rígida para la trayectoria de carga bajo una succión constante mayor ($\zeta_{edo}(0.3) = 0.06$, $\zeta_{edo}(0.05) = 0.11$). En la trayectoria de la descarga, donde se observan deformaciones recuperables, el parámetro de compresibilidad elástica prácticamente fue el mismo en ambas condiciones de succión matricial ($\rho_{edo}(0.3) = 0.002$, $\rho_{edo}(0.05) = 0.0027$).

El esfuerzo de preconsolidación ω_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\omega_v - u_a)$), determinada por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, presenta valores tanto para ω_{v01} como ω_{v02} , que son mayores a los obtenidos para la superficie de fluencia LC con los parámetros de la Tabla 6.1 (Fig. 6.12). Analizando el comportamiento hidráulico, se observa en la Fig. 6.12, que desde las primeras etapas de reducción de succión se presenta entrada de agua a la muestra, generando importantes cambios de volumen irrecuperables y repercutiendo en un movimiento de la superficie de fluencia. En la trayectoria de aumento de succión (D↘ E), se produce una compresión elástica de 0.22% con un parámetro de rigidez elástico de $\rho_{sedo} = 0.002$.

6.1.3.3 Ensayo EDO – 3

En este ensayo, la muestra se fabricó con un esfuerzo máximo de $(\omega_n - u_a) = 0.3$ MPa, dando como resultado unas condiciones iniciales (punto B): $e_0 = 0.78$; $e_{w0} = 0.305$; $(e_w/e)_0 = 0.39$ y $(u_a - u_w)_0 = 0.9$ MPa (Fig. 6.13). En la Fig. 5.1 se muestran estas condiciones en el plano Próctor. A diferencia de los ensayos que complementan el programa, la muestra se fabricó bajo un esfuerzo medio neto menor $(\omega_n - u_a)$, resultando una densidad seca muy similar a la del ensayo EDO-2, pero con un grado de saturación mayor (Tabla 6.2). En la Fig. 6.13 se presentan los resultados del ensayo EDO-3 en un gráfico SWEP, donde se observa que la deformación de colapso en la trayectoria de humedecimiento (C↓D), es menor que la del ensayo EDO-2. Este comportamiento ratifica el hecho de que los suelos con un grado de saturación inicial bajo, presentan una deformación de colapso mayor que los compactados con mayor humedad cuando se someten a un proceso de humedecimiento.

En el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.13), se observa que en el proceso de humedecimiento (C↓D) la trayectoria de la variable de estado volumétrico cruza las líneas de igual grado de saturación con una pendiente menor ($\tau e/\tau e_w = -0.50$), alcanzando un valor de grado de saturación relativamente bajo aunque por encima del 50 %, causando deformaciones irrecuperables del orden del 2.6 % y moviendo la superficie de fluencia LC.

En las Fig. 6.14 aparecen las curvas de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) para cada etapa de cambio de succión matricial ($s = u_a - u_w$). En las primeras etapas las deformaciones irrecuperables en la trayectoria (C↓D) son poco importantes, concentrándose en la última etapa el 62 % de la deformación de colapso medido. En tanto que en la Fig. 6.15 se presenta la evolución temporal de la trayectoria de humedecimiento (C↓D), en términos de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$). En la figura se observa que la mayor cantidad de agua entra en la muestra en la última etapa, manifestándose en un aumento claro de la compresión y del grado de saturación.

Por otro lado, en la Fig. 6.16 se indican los resultados de las diferentes etapas de equilibrio en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios de esfuerzo vertical neto $(\omega_v - u_a)$. Se observa una reducción del volumen de vacíos como consecuencia del incremento de la carga $\div(\omega_v - u_a)$, aumentando ligeramente el grado de saturación y la expulsión de agua de la muestra; mientras que al disminuir la carga, las deformaciones se recuperan parcialmente, manteniéndose prácticamente constante el grado de saturación y el contenido de agua.

A la Fig. 6.17 le corresponde el comportamiento hidromecánico y el movimiento de la superficie de fluencia (LC) de carácter cualitativo en el espacio $(u_a - u_w, \omega_v - u_a)$, considerando los mismos parámetros de la Tabla 6.1. En el espacio $e : \omega_v - u_a$ (Fig. 6.17), se presentan los valores de los parámetros de compresibilidad, $\zeta_{edo}(0.3) = 0.12$ y $\zeta_{edo}(0.05) = 0.14$; para el parámetro de compresibilidad elástica prácticamente se obtiene el mismo valor en ambas condiciones ($\rho_{edo}(0.3) = 0.0036$, $\rho_{edo}(0.05) = 0.0034$). También se observa que en la trayectoria de secado (D↓E), la deformación no se altera en forma significativa (retracción elástica = 0.07 %), mientras que en la trayectoria de mojado (G↓H) se manifiesta en una ligera recuperación elástica ($\kappa_v = 0.25$ %).

El esfuerzo de preconsolidación ω_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln(\omega_v - u_a)$), determinado por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, se presenta en el plano $s : \ln(\omega_v - u_a)$, donde se observa el desplazamiento de superficie de fluencia LC inicial. En la trayectoria de carga (E \Downarrow F) cuando intercepta la LC en el punto de esfuerzo ω_{v01} , el suelo comenzará a comprimirse plásticamente, moviendo la LC al punto final de la trayectoria. En el caso de la trayectoria de carga (H \Downarrow I), las deformaciones irreversibles comenzarán después de alcanzar la LC en el punto de esfuerzo ω_{v02} , moviendo la LC a la posición final (LC final H \Downarrow I), (Fig. 6.17).

En el plano $e_w : u_a - u_w$, se presenta la curva de retención (C \Downarrow D \Downarrow E), donde se observa cómo conforme entra agua a la muestra surgen deformaciones irreversibles, afectando la superficie de fluencia. Por otro lado, en la trayectoria de aumento de la succión se genera una ligera retracción elástica de 0.07%, obteniendo el parámetro de rigidez elástico ($\rho_{sedo} = 0.001$) (Fig. 6.17).

6.1.3.4 Ensayo EDO – 4

En este ensayo, la probeta se fabricó con un contenido de humedad más cercano al óptimo de compactación (Tabla 6.2). Las condiciones iniciales de la muestra son las del punto de esfuerzo (A), (Fig. 6.18): $e_0 = 0.59$; $e_{w0} = 0.33$; $\Phi_0 = 0.50$ MPa y $(e_w/e)_0 = 0.55$ (en el plano Próctor, Fig. 5.1).

Las trayectorias de esfuerzos de A a J, resultaron análogas a los ensayos descritos en los párrafos anteriores (sección 5.2). Debido a que su succión inicial total $\Phi_0 = 0.5$ MPa, la muestra se sujetó a un proceso de equilibrio inicial, imponiendo unas condiciones de succión matricial $(u_a - u_w) = 0.8$ MPa, bajo una carga vertical neta $(\omega_v - u_a) = 0.05$ MPa, lo que generó una retracción inicial ($\kappa_v = 0.35\%$), (punto B, Fig. 6.18).

En la Fig. 6.18, se observa que en la trayectoria de humedecimiento (C \Downarrow D), las deformaciones irreversibles (del orden del 3.6%) son menores que en los ensayos EDO-1 y EDO-2; esto se explica por la mayor densidad y grado de saturación inicial del suelo. Sin embargo, en el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.18), en la trayectoria de humedecimiento (C \Downarrow D) se observa un aumento en el grado de saturación, donde la variable de estado volumétrico cruza las líneas de igual grado de saturación alcanzando un valor muy próximo al 80 %, con una pendiente $\tau e / \tau e_w = -0.90$, lo que causando deformaciones irreversibles. Por otro lado, en la trayectoria de secado (D \Downarrow E) se genera una retracción elástica de $\kappa_v = 0.16$ %, mientras que en la trayectoria de mojado (G \Downarrow H) se manifiesta una ligera recuperación elástica $\kappa_v = 0.08$ % (abajo-derecha, Fig. 6.18).

En el espacio $\kappa : u_a - u_w$ de la Fig. 6.19, durante la trayectoria de humedecimiento (C \Downarrow D) se observa que en la última etapa surge la mayor entrada de agua, provocando el 92 % de la deformación de colapso y en la Fig. 6.20 la evolución temporal de la trayectoria de humedecimiento (C \Downarrow D), donde se observa que la mayor entrada de agua aparece en la última etapa de cambio de succión, generando el mayor cambio de volumen irreversible de la trayectoria, así como el aumento en el grado de saturación.

En la Fig. 6.21, se presentan los resultados en términos de e , e_w y $S_r = e_w/e$ con respecto a los cambios del esfuerzo vertical neto $(\omega_v - u_a)$, donde el mayor cambio en índice de poros se alcanza en la segunda trayectoria de carga (H \Downarrow I), con un valor en el grado de saturación, del 100%.

El comportamiento hidromecánico y el movimiento cualitativo de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w, ω_v-u_a) se presenta en la Fig. 6.22. En el espacio e vs ω_v-u_a , el comportamiento más rígido se obtuvo en la trayectoria realizada bajo una succión mayor ($\zeta_{edo}(0.3) = 0.087$, $\zeta_{edo}(0.05) = 0.11$), mientras que el parámetro de compresibilidad elástica en ambas condiciones, fue el mismo valor ($\rho_{edo} = 0.002$).

El esfuerzo de preconsolidación ω_{v0} (condiciones edométricas, en el plano $v : \ln \omega_v-u_a$), se presenta en el plano $s : \ln \omega_v-u_a$, donde se observa el desplazamiento de la superficie de fluencia LC inicial, generado por las trayectorias de esfuerzos a la que fue sometida la muestra (Fig. 6.22).

6.1.5 Comentarios Finales

En este apartado se comentan algunos aspectos que surgieron durante el programa de ensayos. Algunos resultados confirman la experiencia en la bibliografía.

El análisis de los resultados permite afirmar que las muestras compactadas por la rama seca tienen tendencia a experimentar colapsos; su magnitud está directamente relacionada con la humedad de compactación, el grado de saturación inicial y el nivel de la energía de compactación (Tabla 6.2). En todos los ensayos, el colapso disminuyó al aumentar la humedad de compactación y el grado de saturación inicial del suelo compactado.

En la Fig. 6.23 se incluyen los resultados de los ensayos correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de κ_v y e_w con respecto a los cambios de succión, donde la deformación de colapso mayor es para la muestra (EDO-2), siendo la que presenta una humedad de compactación menor ($e_{w0} = 0.21$ ó $w_0 = 8\%$), disminuyendo este fenómeno conforme aumenta dicha humedad, y en la Fig. 6.24 el proceso de humedecimiento ($C \downarrow D$) con un aumento en el grado de saturación, donde las trayectorias de las variables de estado volumétrico cruzan casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. El ensayo EDO-2 presenta el mayor incremento en su grado de saturación. Este fenómeno se asocia principalmente al colapso del esqueleto del suelo. Se puede admitir que para humedades de compactación bajas, la causa dominante del colapso radica en la desaparición de la succión existente y el consiguiente reordenamiento de la estructura.

Por otro lado, partiendo de una humedad de compactación específica en la rama seca, si las presiones aplicadas crecen (en una trayectoria tensional a succión constante), el suelo sufre una modificación de la estructura, con una reducción importante del índice de vacíos y aumento del grado de saturación que dan como resultado una estructura más ordenada y estable. El nivel de la energía aplicada al suelo al compactarlo también ha sido decisivo en la magnitud de los colapsos obtenidos, ya que niveles de energía de compactación elevados conducen a estructuras más estables cuando se someten a reducciones en su succión (Tabla 6.2). En la Fig. 6.25, se puede observar este fenómeno, donde el ensayo EDO-3 presenta menor deformación volumétrica. En la trayectoria de carga, donde el incremento del esfuerzo vertical neto (ω_v-u_a) causa una reducción en los vacíos, se esperaría un aumento en el grado de saturación, pero debido a la expulsión de agua, el grado de saturación, permanece casi constante.

Por otro lado, estos ensayos edométricos también han brindado información útil para determinar unos parámetros en términos del esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$). En las trayectorias de carga E \Downarrow F y H \Downarrow I se determinaron las pendientes de las curvas ζ_{edo} (bajo condiciones edométricas: $v: \ln(\omega_v - u_a)$), presentando valores menores para trayectorias bajo una succión mayor (Fig. 6.26). A partir de la rama de descarga (trayectorias F \Downarrow G y I \Downarrow J) se miden las pendientes de las curvas (bajo condiciones edométricas: $v: \ln(\omega_v - u_a)$) ρ_{edo} , presentando valores similares en ambas trayectorias.

En la trayectoria de secado, en el plano $e: \ln(u_a - u_w)$, se obtuvo el parámetro de rigidez elástica ρ_{sedo} (Tabla 6.3). Con los valores del esfuerzo de preconsolidación ω_{v0} y considerando los parámetros del modelo (Alonso, *et al*, 1990) $\zeta(0)$, y ρ obtenidos de los ensayos de compresión isótropa bajo condiciones saturadas (Tabla 6.1), se pudo analizar en forma cualitativa el movimiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio ($\omega_v - u_a, u_a - u_w$) debido a las diferentes trayectorias de esfuerzos realizadas.

En la Fig. 6.27, se muestra una vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de los esfuerzos (p, q, s). También se indica en forma esquemática el desplazamiento de la superficie de fluencia LC en la trayectoria de humedecimiento C \Downarrow D. Las condiciones iniciales corresponden a las generadas por el proceso de compactación en condiciones isótropas, y en la Fig. 6.27 se indica la superficie de fluencia (LC inicial) adoptada. En la trayectoria del incremento del esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$) a succión constante (B \Downarrow C) tiene lugar en el interior de la superficie de fluencia inicial (LC inicial) y, por tanto, las deformaciones asociadas serán elásticas. Cabe recordar que en estos ensayos no se ha registrado la evolución del esfuerzo horizontal (ω_h), por lo que la trayectoria K_0 no se midió. Se puede estimar este valor mediante la expresión propuesta por Jaky (Wood, 1990) para suelos saturados:

$$K_0 \mid 14 \text{ sen } \pi' \quad (6.1)$$

Con la cual se pueden estimar el esfuerzo horizontal (ω_h), el esfuerzo medio (p), y el esfuerzo desviador (q):

$$K_0 \mid \frac{\omega_h}{\omega_v} \frac{4 u_a}{4 u_a} \quad ; \quad p \mid \frac{\omega_v}{3} \frac{2 \omega_h}{4 u_a} \quad \text{y} \quad q = \omega_v - \omega_h \quad (6.2)$$

El valor de π' se obtiene de los ensayos triaxiales con control de succión. Con ello, es una forma de comprobar que la trayectoria (B \Downarrow C) tiene lugar en el interior de la superficie de fluencia inicial (LC inicial). Romero (1999) midió valores de K_0 en suelos parcialmente saturados y normalmente consolidados inferiores a los estimados por la ecuación 6.1. Ciertas experiencias de Romero (1999) en ensayos edométricos en un suelo colapsable en trayectorias de humedecimiento bajo esfuerzo vertical constante, muestran cambios relativamente importantes de la relación K_0 durante dicho proceso (primero un aumento y después una disminución a medida que se reduce la succión), por lo que se puede decir que K_0 depende de la succión. Por esta razón, las variables de esfuerzos p y q presentan variaciones difíciles de predecir en un ensayo bajo condiciones edométricas.

Tabla 6.2 Cambios de volumen en trayectorias de humedecimiento–secado.

Ensayo	Deformaciones				Condiciones iniciales##				
	κ_v (%)	κ_v (%)	# κ_v (%)	κ_v (%) *	ω_m-u_a	e_0	e_{w0}	$(e_w/e)_0$	$\Phi\#$
	A↓ B Equilibrio	C↓ D, mojado Colapso máximo	D↓ E secado	G↓ H Mojado	MPa				MPa
EDO-1	----	4.13	0.21	- 0.08	0.6	0.68	0.29	0.43	0.8
EDO-2	0.30 *	11.2	0.22	- 0.13	0.6	0.74	0.21	0.28	2.1
EDO-3	----	2.6	0.07	- 0.245	0.3	0.78	0.30	0.39	0.9
EDO-4	0.35	3.6	0.16	- 0.08	0.6	0.59	0.33	0.55	0.50

*recuperación elástica de la deformación; ω_m-u_a : esfuerzo medio neto de compactación estática en condiciones isotropas; Φ : succión total (técnica psicrométrica); κ_v : deformación volumétrica.

En las Figs. 6.7, 6.12, 6.17 y 6.22, en el plano $e : u_a-u_w$ se puede observar que a una succión determinada se produce un quiebro. Este punto se ha asociado con la intersección de la trayectoria de esfuerzos representada en la Fig. 6.27 con la superficie de fluencia inicial LC. A partir de este punto se generan deformaciones plásticas cuya componente volumétrica induce un endurecimiento de la superficie de fluencia, arrastrándola hasta la posición final (LC final). La compresión inicial puede asociarse a un aumento del esfuerzo medio neto en la etapa inicial de disminución de la succión. A partir del punto de fluencia se consideró que el esfuerzo medio neto no se modificaba con el decremento de la succión (Fig. 6.27).

El equipo edométrico con control de succión es un equipo que permite determinar las deformaciones volumétricas en suelos no saturados, bajo control de succión matricial, empleando la técnica de traslación de ejes. Se han detectado deformaciones volumétricas en trayectorias de humedecimiento y secado del orden de 0.08 y 0.07 % respectivamente, ya que las deformaciones propias del equipo son mínimas al ser muy rígido. El diseño del equipo facilita realizar ensayos con trayectorias complejas en el plano $\omega_v-u_a : u_a-u_w$ que son relativamente largos en tiempo, obteniendo buenos resultados.

Tabla 6.3 Parámetros del suelo en términos del esfuerzo vertical neto.

Ensayo	ω_m-u_a MPa	$\omega_{v01}(0.3)$ MPa	$\zeta_{edo} (0.3)$	$\rho_{edo} (0.3)$	# $\omega_{v02}(0.5)$ MPa	$\zeta_{edo} (0.05)$	$\rho_{edo} (0.05)$ (descarga)	ρ_{sedo} (secado)
EDO-1	0.6	0.87	0.084	0.002	1.07	0.12	0.002	0.002
EDO-2	0.6	1.6 ?	0.060	0.0022	1.93 ?	0.11	0.0027	0.002
EDO-3	0.3	0.41	0.12	0.0036	0.95	0.14	0.0034	0.001
EDO-4	0.6	0.91	0.087	0.002	1.06	0.11	0.002	0.001

ω_{v0} : esfuerzo de preconsolidación en condiciones edométricas en el plano $v : \ln(\omega_v-u_a)$.

Al final de cada ensayo se pesa la muestra para determinar su humedad, de manera que pueda compararse con el valor calculado mediante lecturas del medidor de cambio del volumen de agua intersticial. En la Tabla 6.4 se presentan los valores obtenidos.

Tabla 6.4 Contenido de agua en las muestras al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
EDO-1	15.22	15.86
EDO-2	12.70	12.79
EDO-3	13.66	14.0
EDO-4	13.92	14.47

Con estos valores se puede considerar que el sistema de medida empleado es apropiado para evaluar los cambios en contenido de agua del suelo durante el ensayo, considerando que han sido ensayos donde se ha invertido tiempos largos.

6.2 Resultados isótropos con control de succión

6.2.1 Ensayos isótropos: Mini – célula isótropa rígida

6.2.1.1 Ensayos de humedecimiento bajo carga constante

En esta sección se presentan y se analizan los resultados experimentales de los ensayos isótropos con control de succión en la mini-célula isótropa rígida, descrita en la sección 3.6. El programa de ensayos y las trayectorias tuvieron como objetivo analizar el comportamiento deformacional de un suelo sobreconsolidado no saturado, asociado con los cambios de succión bajo carga constante; así como obtener parámetros que proporcionaran la forma y el movimiento de la superficie de fluencia LC en una trayectoria de humedecimiento. El estado sobreconsolidado se llevó a cabo mediante compactación isótropa. Se trató de aplicar trayectorias de esfuerzos en las que el suelo sobreconsolidado, en una primera etapa fuera sometido a una carga isótropa bajo succión constante. Posteriormente, se procedió con la trayectoria de humedecimiento de la muestra bajo una carga constante. En la Tabla 6.5 se presentan las condiciones iniciales de las muestras ensayadas, y en la Fig. 5.7a su representación en el plano Próctor.

Tabla 6.5 Condiciones iniciales de las muestras ensayadas.

Ensayo	w ₀ %	e _w	ψ _{d0} g/cm ³	e ₀	e _w /e ₀	Φ# MPa	/ω _{m-u_a}) ₀ MPa#	/ω _{m-u_a}) MPa
ISOW-1	11.0	0.298	1.66	0.629	0.47	0.8	0.6	0.3
ISOW-2	8.0	0.217	1.52	0.777	0.28	2.1	0.6	0.3
ISOW-3	11.0	0.298	1.53	0.776	0.38	0.9	0.3	0.2
ISOW-4	12.0	0.325	1.69	0.598	0.54	0.6	0.6	0.3

Nota: (ω_{m-u_a})₀ = p₀: esfuerzo medio de compactación estática en condiciones isótropas; (ω_{m-u_a}): esfuerzo medio neto en la etapa de humedecimiento; Φ: succión total inicial (técnica psicrométrica).

En las Figs. 6.28, 6.29, 6.30 y 6.31 se presentan los resultados isotrópicos de los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3 y ISOW-4 respectivamente en gráficos SWEP. La trayectoria de esfuerzos de B a D en los ensayos, se resume de la siguiente manera (descrita en detalle en 5.3).

Inicialmente, la muestra se somete a un proceso de carga isotrópica de manera continua a una velocidad de variación constante de 0.04 MPa/día hasta 0.3 MPa, excepto para el ensayo ISOW-3 (hasta un valor de 0.2 MPa), bajo succión constante; se continuó con la trayectoria de humedecimiento en las muestras sobreconsolidadas, manteniendo la presión de aire constante (u_a) y aumentando la presión de agua (u_w) en forma continua a una velocidad de variación constante igual a 0.02 MPa/día. De esta manera se disminuyó la succión matricial hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.01$ MPa, bajo esfuerzo medio neto constante ($\sigma_n - u_a$) (Tabla 6.5). En la trayectoria (D \Downarrow E) del ensayo ISOW-4 (Fig. 6.31), la presión de agua (u_w) y presión de aire (u_a) se suministraron con el mismo regulador, para garantizar la igualdad de las presiones intersticiales.

En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.28-6.31), se observa que en el proceso de humedecimiento (C \Downarrow D) se desarrollan cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de estado volumétrico ($\tau e/\tau e_w - 0.35, -0.50, -0.55, -0.60$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. El aumento promedio en el grado de saturación para estos ensayos fue aproximadamente de $\pm S_r - 16\%$; se observa también un proceso recuperable e irrecuperable en la deformación volumétrica, debido a una expansión y colapso respectivamente del esqueleto del suelo (abajo-derecha, Fig. 6.28-6.31). Este comportamiento era de esperar, por que las muestras son sobreconsolidadas, y la trayectoria de humedecimiento, bajo carga constante se inicia dentro de la superficie de fluencia inicial LC (loading-collapse). En la Tabla 6.6 se presentan esas deformaciones volumétricas.

Tabla 6.6 Cambios de volumen. Ensayos isotrópicos (mini-célula isotrópica rígida).

Ensayo	κ_v (%) expansión	κ_v (%) colapso#	$\tau e/\tau e_w$ #	$\tau e/\tau e_w$ #	p_{01} (MPa) #
ISOW-1	- 0.40	--	- 0.35	0.01	?
ISOW-2	- 2.3	--	- 0.50	0.02	?
ISOW-3	- 0.40	3.74	- 0.40	0.09	0.022
ISOW-4	- 0.13	--	- 0.60	0.003	?

Las Figs. 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35, contienen los resultados de los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3 y ISOW-4 respectivamente, en términos de deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a la variación de la succión matricial ($s = u_a - u_w$). Cabe recordar que la medida de la deformación volumétrica de la muestra es global, obtenida a través de un medidor de volumen que nos mide el flujo que entra o sale de la cámara de confinamiento de la célula. Este sistema es capaz de medir deformaciones volumétricas con una resolución de 30 %. El segundo medidor de volumen se utiliza para conocer la cantidad de agua intersticial que entra o sale de la muestra (Anexo B).

En las figuras mencionadas (Figs. 6.32-6.35), se observa que la expansión máxima coincide con el cambio de pendiente de las curvas de relación de agua y de grado de saturación. Esto indica que en el momento en que entra mayor cantidad de agua a la muestra comienza el cambio de sentido en las

deformaciones volumétricas. En la Fig. 6.34, que corresponde al ensayo ISOW-3 (muestra compactada a menor presión isotrópica) se aprecian dos cambios de pendientes en la curva representada en el plano $e_w:u_a-u_w$ y $e_w/e:u_a-u_w$. Un cambio es en la deformación volumétrica (κ_v) dentro del rango de succión $s = 0.5$ a 0.018 MPa. El segundo cambio de pendiente, mayor que el primero, comienza después de una succión por debajo de 0.018 MPa, midiéndose una deformación de colapso del orden de $\kappa_v = 3.74$ %, lo que ocasiona un desplazamiento de la superficie de fluencia inicial LC (Fig. 6.38).

En el ensayo ISOW-4, donde las condiciones iniciales de la muestra son muy próximas a las condiciones óptimas en una curva de compactación en el plano Próctor (Fig. 5.7a), la trayectoria de humedecimiento se realizó hasta alcanzar una succión igual a cero ($u_a = u_w$). En la Fig. 6.35, se observa que las deformaciones volumétricas fueron menores que la resolución que se puede registrar con este sistema, por lo que se atribuyen en parte a cambios de temperatura. Este comportamiento confirma que en muestras con una humedad de compactación muy cercana al óptimo, las deformaciones por colapso serán mínimas (Rico y del Castillo, 1976).

Por su parte, las Figs. 6.36, 6.37, 6.38 y 6.39, presentan en el plano esfuerzo medio neto y succión matricial (σ_n-u_a) : (u_a-u_w), la superficie de fluencia inicial a partir de la presión de compactación estática en condiciones isotrópicas y los parámetros derivados de los ensayos saturados. En la Tabla 6.7 se muestran los parámetros para representar la forma y el movimiento de la curva LC. En relación con los parámetros utilizados hasta ahora para describir cualitativamente el comportamiento del suelo en los ensayos edométricos se ha incrementado el valor del parámetro η para un mejor ajuste del punto de cruce de las superficies de fluencia en trayectorias de humedecimiento. El valor del parámetro p^c también se ha reducido para una mejor representación del movimiento de la superficie de fluencia LC debido a los cambios de esfuerzo y succión.

Tabla 6.7 Parámetros del modelo para el análisis de los ensayos isotrópicos.

ξ (0)	p	η (1/MPa)	r	p^c (Pa)
0.073	0.011	100	0.8	65

En las mismas figuras se muestra la localización de la presión de preconsolidación (p_{01}), (Tabla 6.6) obtenida por un proceso de humedecimiento de los ensayos ISOW-1, ISOW-2, ISOW-3 y ISOW-4 respectivamente. También se presenta el comportamiento hidráulico en el plano $e : u_a-u_w$. De estos gráficos se concluye que los resultados de los ensayos no fueron del todo coherentes para suelos muy sobreconsolidados, el caso de los ensayos ISOW-1 (Fig. 6.36), ISOW-2 (Fig. 6.37), y ISOW-4 (Fig. 6.39).

Por el contrario, para una muestra ligeramente sobreconsolidada (Fig. 6.38), al reducir la succión se intercepta la superficie de fluencia inicial LC (inicial) en el punto de esfuerzo p_{01} (presión de preconsolidación obtenido en el plano $e : u_a-u_w$), que es coherente con la forma de la superficie LC supuesta.

6.2.1.2 Ensayos de humedecimiento – secado y carga – descarga

Se presentan y se analizan los resultados de los ensayos complementarios del programa de ensayos isotrópicos realizados en la mini-célula isotrópica rígida. Las trayectorias de esfuerzos tuvieron como propósito analizar el comportamiento de deformación de un suelo no saturado asociado con los cambios de succión y de esfuerzo, así como obtener la forma y expansión de la superficie de fluencia (LC), bajo un fenómeno de colapso e incremento del esfuerzo.

Se trató de aplicar trayectorias de esfuerzos en las que el suelo en una primera etapa se somete a un proceso de carga isotrópica de manera continua a una velocidad de variación constante de 0.04 MPa/día, hasta alcanzar el esfuerzo isotrópico de compactación, bajo una succión constante (Tabla 6.8). En una segunda etapa se llevó a cabo una trayectoria de humedecimiento, manteniendo la presión de aire constante (u_a), y aumentando la presión de agua (u_w) en forma continua a una velocidad de variación constante igual a 0.02 MPa/día, hasta un valor de succión de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa; posteriormente, se procedió a la desaturación de la muestra, manteniendo en toda la etapa el esfuerzo constante. En una tercera etapa se procedió con un ciclo de carga–descarga, bajo succión constante. La trayectoria de esfuerzos de A a G se describe a detalle en la sección 5.3. En la Tabla 6.8 se presentan las condiciones iniciales de las muestras ensayadas, y en la Fig. 5.7a se representan en el plano Próctor.

Las Figs. 6.40 y 6.41, contienen los resultados isotrópicos de los ensayos ISO-1 y ISO-2 respectivamente, representados en gráficos SWEP. En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.40, 6.41) se observa que en el proceso de humedecimiento (C↓D) se desarrollan cambios importantes en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$) mayores que en los ensayos ISOW, donde la trayectoria de estado volumétrico ($\tau_e/\tau_{e_w} = -0.94, -1.4$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. Estos importantes cambios se asocian a la ocurrencia de un proceso irrecuperable de compresión volumétrica, debido al colapso del esqueleto del suelo. En la trayectoria de secado (D↓E), se aprecia una respuesta rígida, asociada a pequeños cambios de agua y la relación de vacíos. En las trayectorias de carga y descarga no se presentan variaciones considerables en el grado de saturación, observándose una tendencia casi paralela a las líneas de igual grado de saturación (S_r).

Tabal 6.8 Estado inicial de las muestras de los ensayos isotrópicos (mini-célula isotrópica rígida).

Ensayo	w_0 %	e_w	Ψ_{d0} g/cm ³	e_0	e_w/e_0	$\Phi\#$ MPa	$/(u_m - u_a)_0$ MPa#
ISO-1	11.0	0.298	1.67	0.620	0.48	0.8	0.6
ISO-2	8.0	0.217	1.55	0.743	0.29	2.1	0.6

Nota: $(u_m - u_a)_0 = p_0$: compactación estática en condiciones isotrópicas; Φ : succión total inicial (técnica psicrométrica).

En las Figs. 6.42 y 6.43, se proporcionan información de la evolución del cambio de volumen (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación ($S_r = e_w/e$) con respecto a la variación de la succión matricial ($u_a - u_w$) de los ensayos ISO-1 y ISO-2. Para el ensayo ISO-2, la deformación de colapso se genera a partir de una succión de 0.53 MPa, mientras que en la muestra del ensayo ISO-1 se genera a partir de una succión de 0.13 MPa. Por otro lado, la muestra del ensayo ISO-2 presenta mayores cambios en el grado de saturación (e_w/e), y en su relación de agua (e_w). Estos comportamientos eran de

esperarse, debido a que la muestra del ensayo ISO-2 exhibe una estructura inicial más abierta y una humedad de compactación menor.

En las Figs. 6.44a y 6.45a se indican los resultados en términos de e , e_w y e_w/e con respecto a los cambios del esfuerzo medio neto (ω_n-u_a) de los ensayos ISO-1 y ISO-2. En el plano $e : (\omega_n-u_a)$ se presenta la deformación de colapso siendo mayor para la muestra del ensayo ISO-2 ($\kappa_v = 8.6 \%$) que para la muestra del ensayo ISO-1 ($\kappa_v=3.4 \%$). También se midió un ligero aumento en el grado de saturación y expulsión de agua de la muestra como consecuencia del incremento de la carga mientras que al disminuirla las deformaciones se recuperan parcialmente manteniéndose prácticamente constante el grado de saturación y la humedad.

En tanto que en las Figs. Fig. 6.44b y 6.45b se presentan sólo los resultados de la trayectoria de carga–descarga (E↓ F↓ G) de los ensayos ISO-1 y ISO-2, para mostrar la evidencia de un único esfuerzo de fluencia a partir de la cual comienzan los fenómenos plásticos asociados con las variables volumétricas e , e_w y e_w/e . Igualmente se observa un incremento apreciable en el grado de saturación con la compresión en la zona elastoplásticas.

Las Figs. 6.46 y 6.47, se refieren al comportamiento mecánico de los ensayos ISO-1 y ISO-2 en el plano $e : \omega_n-u_a$ del ciclo de carga y descarga (E↓ F↓ G), bajo una succión matricial constante ($s = 0.2$ MPa). El comportamiento hidráulico se representa en la trayectoria de humedecimiento y secado (C↓ D↓ E) en el plano $e : u_a-u_w$. Finalmente en el plano $\omega_n-u_a : u_a-u_w$ se presenta el aumento de tamaño de la superficie de fluencia inicial, asociado a los cambios de succión y del esfuerzo.

Al igual que en los ensayos edométricos con control de succión, en las trayectorias de carga-descarga del esfuerzo isotrópico, se observa una zona antes y después del punto de fluencia, el cual se obtiene por la intersección de la extrapolación lineal de ambas zonas. En las Fig. 6.46 y 6.47 y en la Tabla 6.9 se indican los valores de los parámetros de compresibilidad, donde ρ en el plano $e : \omega_n-u_a$ representa el parámetro de compresibilidad en el rango elástico, y $\zeta(s)$ el parámetro de compresibilidad en el rango elastoplástico.

Analizando el comportamiento hidráulico en el plano $e : u_a-u_w$ de la trayectoria de humedecimiento (C↓ D) (Fig. 6.46 y 6.47) se observa que al disminuir la succión matricial se intercepta la superficie de fluencia inicial (LC inicial) en el punto de esfuerzo p_{01} donde posteriormente el suelo comenzará a comprimirse plásticamente moviendo la LC. En la trayectoria de secado (D↓ E) se genera una compresión elástica, que permite obtener el parámetro de rigidez elástica ρ_s (Tabla 6.9).

El esfuerzo de preconsolidación p_{02} puede determinarse a partir de la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica en el plano $e : \omega_n-u_a$. Una vez que en la trayectoria de carga (E↓ F) alcanza p_{02} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie LC se lleva al punto de esfuerzo final de la trayectoria LC (E↓ F) final.

En la Fig. 6.48 se muestra en forma esquemática una vista tridimensional de las superficies de fluencia en el espacio de los esfuerzos (p , q , s), obtenidas tras el desplazamiento de la superficie de fluencia inicial (LC). Las condiciones iniciales corresponden a las generadas por el proceso de compactación en condiciones isotrópicas. En la trayectoria de humedecimiento (C↓ D) se aprecia cómo se desplaza esquemáticamente la superficie de fluencia inicial. La trayectoria de secado (D↓ E) tiene lugar en el

interior de la superficie de fluencia (LC final (C↓ D)); por tanto las deformaciones asociadas serán elásticas. En la trayectoria del incremento del esfuerzo isotropo (ω_m-u_a) a succión constante una vez que se alcanza la superficie de fluencia LC final (C↓ D) en el punto de esfuerzo p_{02} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie se mueve al punto de esfuerzo final de la trayectoria (E↓ F).

Tabla 6.9 Parámetros del suelo. Ensayos isotropos (Mini-célula isotropa rígida).

Ensayo	κ_v (%)	e_w colapso#	e_{lns} colapso#	ρ_s	ρ	ζ (0.2)	p_{01} (MPa) fenómeno hidráulico #	p_{02} (MPa) fenómeno mecánico
ISO-1	3.38	- 0.94	0.03	0.002	0.003	0.10	0.13	0.84
ISO-2	8.60	- 1.4	0.04	0.001	0.002	0.12	0.53	0.87

6.2.1.3 Comentarios finales

En la Fig. 6.49 presenta los dos ensayos isotropos (ISO-1 y ISO-2) en los planos ($e : e_w$), ($e_w : u_a-u_w$) y ($\kappa_v, e : \omega_m-u_a$). Se observa que el ensayo ISO-2 muestra un aumento mayor en el grado de saturación generando una deformación de colapso mas grande que el ensayo ISO-1. Tal como era de esperar este comportamiento en el ensayo ISO-2 se debe a que la muestra fue fabricada con unas condiciones iniciales de humedad y densidad menores que la muestra del ensayo ISO-1. Este comportamiento corrobora el hecho de que los suelos con una estructura menos densa son más propensos a un fenómeno de colapso al presentar un aumento en su grado de saturación.

En los ensayos de humedecimiento en muestras sobreconsolidadas, el equipo no fue capaz de medir con precisión las pequeñas deformaciones experimentadas por las muestras. Sin embargo, en muestras normalmente consolidadas y ligeramente consolidadas, el equipo mostró capacidad para determinar deformaciones volumétricas (κ_v) de la muestra, bajo trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga.

En el programa de ensayos en la mini-célula isotropa rígida, se ha podido definir la superficie de fluencia con un conjunto único de parámetros (Tabla 6.7). El desplazamiento de la superficie de fluencia en trayectorias de carga–descarga y en trayectorias donde se produce un fenómeno de colapso resultó coherente con los ensayos.

Una de las ventajas de la mini-célula isotropa, es la importante reducción en el tiempo de equilibrado de las presiones intersticiales, debido a las pequeñas dimensiones de la probeta ($\lambda \approx 20$ mm, $h = 20$ mm).

En cambio, una desventaja es que sólo presenta un frente de hidratación en la parte inferior de la muestra, por lo que puede quedar aire atrapado en la parte superior, haciendo difícil de lograr grados de saturación elevados. Por otro lado, el sistema de medida de volumen es capaz de detectar variaciones con una resolución de la deformación volumétrica de 0.3 %, lo que es elevada comparada con la del equipo edométrico de 0.01 %; por esta razón, el equipo no es adecuado para ensayar muestras que presenten una rigidez alta frente a cambios de esfuerzo y succión.

Al final de cada ensayo se ha determinado la humedad de la muestra, de manera que pueda ser contrastada con el valor calculado mediante las lecturas del medidor de volumen del cambio de agua intersticial. Estos valores se indican en la Tabla 6.10. Con la diferencia de valores obtenida se puede considerar que el sistema de medida empleado es apropiado para evaluar los cambios de humedad del suelo durante el ensayo.

Tabla 6.10 Contenido de agua en las muestras al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
ISO-1	11.32	10.99
ISO-2	11.52	11.28
ISOW-1	12.97	13.08
ISOW-2	14.21	13.66
ISOW-3	13.72	13.60
ISOW-4	17.05	16.43

6.2.2 Ensayos isótropos: Célula triaxial con control de succión

6.2.2.1 Trayectorias múltiples de humedecimiento – secado y carga – descarga

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos bajo esfuerzo isótropo y control de la succión matricial, realizados en la célula triaxial. En la Tabla 6.11 se presentan las condiciones iniciales de la muestra, y en la Fig. 5.7b su posición en el plano Próctor. El programa del ensayo de compresión isótropa se realizó con una célula triaxial con control de succión, donde es posible registrar la evolución temporal de las deformaciones axiales (κ_1) y radiales (κ_3) en forma local y global (sección 3.7, Fig. 3.21). Los resultados incluyen la evolución temporal de las deformaciones axiales y radiales y los cambios en contenido de agua, así como el estado de equilibrio al final de cada etapa en los ciclos de humedecimiento–secado, y carga–descarga. La información de la respuesta del suelo se representa con la evolución de la deformación volumétrica ($\kappa_v = \kappa_1 + 2 \kappa_3$) y la deformación de corte ($\kappa_s = 2(\kappa_1 - \kappa_3)/3$). La información se complementa con la evolución del contenido de humedad (w) y del grado de saturación (S_r).

La trayectoria de esfuerzos B a J es análoga a la efectuada con la célula edométrica, que se resume de la siguiente manera (descrita a detalle en 5.4). Se llevó a cabo una trayectoria de incremento en la carga isótropa hasta un valor de $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa (B \Downarrow C) bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.8$ MPa); se prosiguió con un ciclo de humedecimiento-secado (C \Downarrow E), bajo un esfuerzo medio neto constante ($\sigma_m - u_a = 0.6$ MPa), mantenido a la presión de aire constante ($u_a = 0.9$ MPa) y controlando la presión de agua (u_w). La trayectoria de humedecimiento se hizo por etapas hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa (punto D). Posteriormente, la muestra se sometió a una trayectoria de secado hasta un valor de $(u_a - u_w) = 0.15$ MPa (punto E), y después se sujetó a una trayectoria de carga (E \Downarrow F) y descarga (F \Downarrow G) bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.15$ MPa). Se continuó con una trayectoria de humedecimiento hasta un valor de succión de $(u_a - u_w) = 0.02$ MPa (punto H); finalmente, se repitió una trayectoria de carga (H \Downarrow I) y descarga (I \Downarrow J) a succión constante ($u_a - u_w = 0.02$ MPa), (Fig.6.50).

Tabla 6.11 Condiciones iniciales de la muestra. Ensayo isótropo (célula triaxial).

Ensayo	w_0 (%)	e_w	e_w/e	Ψ_{d_0} g/cm ³	e_0	$\Phi_0\#$ MPa	$(\omega_m - u_a)_0$ MPa
TISO-1	11.0	0.298	0.48	1.66	0.627	0.8	0.6

$(\omega_m - u_a)_0$: esfuerzo medio de compactación; Φ_0 : succión total inicial (técnica psicrométrica)

La Fig. 6.50 presenta los resultados en un gráfico SWEP con información general del comportamiento mecánico e hidráulico del ensayo. En el plano de la variable de estado volumétrico (abajo-izquierda, Fig. 6.50), se observa el proceso de humedecimiento (C \downarrow D) desarrollando cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de la variable de estado volumétrico ($v_e/v_{e_w} = 0.68$) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación ($S_r = e_w/e$). Por otra parte, este cambio en el grado de saturación se asocia con la ocurrencia de un proceso irre recuperable de compresión volumétrica, que se relaciona con el desplazamiento de la superficie LC. En la trayectoria de secado (D \downarrow E) hay una respuesta rígida, asociada a cambios pequeños en agua y la relación de vacíos. No obstante, en esta trayectoria de incremento de succión, es más fácil expulsar agua que inducir deformación del esqueleto.

La Fig. 6.51 corresponde a la etapa de humedecimiento donde se redujo la succión matricial de $(u_a - u_w) = 0.10$ MPa a 0.02 MPa bajo un esfuerzo medio neto de $(\sigma_m - u_a) = 0.6$ MPa. Se muestra la evolución temporal de las deformaciones axial (κ_l), radial (κ_r), volumétrica (κ_v) y de corte (κ_s), así como los cambios en contenidos de agua (e_w) y grados de saturación $S_r = e_w/e$. La evolución de la deformación radial corresponde a la parte central del espécimen (indicado con un subíndice “c”). Por otro lado la evolución de la relación entre la deformación axial y radial (κ_l/κ_{rc}) complementa la descripción de la distorsión de la muestra en este proceso de mojado. Se puede observar una tendencia de hinchamiento al inicio de la etapa, que se detecta por los LVDTs locales a pesar de que la trayectoria de esfuerzos, parte de un punto en la superficie de fluencia LC impuesta por la compactación estática. Este comportamiento se explica en términos de un cierto incremento de presión de aire atrapado durante las etapas iniciales de humedecimiento que induce una pequeña descarga del esfuerzo neto sobre la muestra. Este efecto también ha sido observado por Romero (1999).

Por otro lado, las diferencias de lecturas en los sensores láser (láser 1 y 2) en la obtención de las deformaciones radiales se deben a los pequeños desplazamientos horizontales inducidos por el movimiento libre del cabezal (se usó un vástago de alineación para controlar la inclinación inicial de la muestra). No obstante, al sumar ambas lecturas (láser 1 y 2) los movimientos horizontales como sólido-rígidos se compensan, y la deformación radial puede obtenerse sin errores. En Romero (1999), se discuten más aspectos sobre los errores en la medida de los desplazamientos laterales.

En la misma figura se observa que se han alcanzado bajos grados de saturación en la muestra al aplicar una succión matricial de 0.02 MPa. Este fenómeno está parcialmente asociado al sistema de doble drenaje usado en la célula triaxial, donde queda aire atrapado en el centro del espécimen que es difícil de expulsar. Por tanto, se esperarían mayores deformaciones de colapso si se consiguiera hacer entrar un contenido mayor de agua en la muestra. En el ensayo edométrico EDO-1, se puede comparar que se logran mayores grados de saturación ($S_r = e_w/e = 0.72$) a mayor succión matricial (0.05 MPa) siguiendo una trayectoria similar de humedecimiento (sección 6.1.3.1).

Como era de esperar para una muestra compactada en condiciones isotrópicas, se observa una evolución isotrópica que se evidencia por las bajas deformaciones de corte que se desarrollan y por la tendencia a la unidad de la relación entre la deformación axial y radial (κ_l/κ_{3c}).

En la Fig. 6.52 se indican los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio de la trayectoria de humedecimiento-secado (C \Downarrow D \Downarrow E) en términos de la deformación axial (κ_l), radial (κ_3), de corte (κ_c) y volumétrica (κ_v), así como contenidos de agua (e_w) y grados de saturación (e_w/e). La deformación volumétrica y de corte, así como los valores de grado de saturación se calcularon con base en la deformación radial medida en la zona central de la probeta (indicado con el subíndice “c”). En los resultados de la deformación de corte se muestra una evolución isotrópica, midiéndose una pequeña distorsión de la muestra al inicio de la etapa de humedecimiento. Por otro lado, al igual que en los ensayos edométricos, no se observan importantes deformaciones de colapso en las primeras etapas de humedecimiento, concentrándose aproximadamente el 80 % de la deformación en la última etapa. Este comportamiento se asocia a la forma de la superficie de fluencia (LC) en el plano (u_a-u_w) : (ω_m-u_a), que presenta una pendiente casi vertical en el rango de succiones no muy cercanas a cero.

El aumento en el grado de saturación en la trayectoria (C \Downarrow D), se vincula a la ocurrencia de un proceso irre recuperable de compresión volumétrica debido al colapso del esqueleto del suelo, que se relaciona con el desplazamiento de la superficie de fluencia LC en un proceso de endurecimiento. En el caso de la etapa de secado (D \Downarrow E) se observa una respuesta rígida, asociada a cambios pequeños en agua y en la relación de vacíos.

En la Fig. 6.53a trata a cerca de los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos de la deformación axial local (κ_l), radial local y global (κ_{3c} , κ_3) y volumétrica local (κ_{vc}) y global (κ_v) (determinada con la deformación radial global), así como los contenidos de agua (e_w) y grados de saturación (e_w/e) con respecto a los cambios del esfuerzo medio neto (ω_m-u_a). Se observa que la deformación axial y radial tienen un comportamiento similar, presentando una deformación volumétrica isotrópica. También se compara la deformación radial local (κ_{3c}) y global (κ_3) para cada etapa de carga, siendo ligeramente mayor la deformación local (κ_{3c}) y que se relaciona con una mayor deformación volumétrica (κ_{vc}). La diferencia de la deformación radial local y global se debe a la no-uniformidad de la deformación radial de la muestra provocada por los efectos de fricción en ambos extremos de la probeta. Este fenómeno se puede observar en las Figs. 6.57 a 6.60. Para el cálculo del grado de saturación ($S_r = e_w/e$) se consideró la medida global de la deformación volumétrica.

En las trayectorias de carga (E \Downarrow F y H \Downarrow I) de las Fig. Fig. 6.53a y 6.53b, se observa una reducción del volumen de vacíos que implicaría un aumento del grado de saturación, pero debido a que se registró simultáneamente una expulsión de agua, el grado de saturación permanece casi constante creciendo ligeramente en la zona elastoplástica. En la Fig. 6.53b, se presentan las trayectorias de carga-descarga (E \Downarrow F \Downarrow G y H \Downarrow I \Downarrow J), constatando un esfuerzo de fluencia a partir de la cual comienzan los fenómenos plásticos asociados a las variables volumétricas e , e_w , y e_w/e al igual que en los ensayos isotrópicos realizados en la mini-célula isotrópica; y en la Fig. 6.50 (abajo-izquierda) se observa una tendencia paralela a las líneas de igual grado de saturación en la trayectoria de carga.

En la Fig. 6.57, se referencia el desarrollo de la deformación radial global (κ_3) a través del perfil de la muestra para las diferentes etapas de humedecimiento y secado (C \Downarrow D \Downarrow E), bajo esfuerzo medio

constante ($\omega_n-u_a= 0.6$ MPa). El primer perfil representa la deformación radial acumulada de la trayectoria de carga (B↓ C) hasta alcanzar un esfuerzo medio de (ω_n-u_a)= 0.6 MPa.

Los diferentes perfiles representan la deformación acumulada hasta el equilibrio en las diferentes etapas de cambio de succión. El promedio de la deformación lateral ($\bar{\kappa}_3$) también se incluya en la figura. Se observa que en la trayectoria de mojado, específicamente en la etapa de cambio de succión de ($s = 0.1$ MPa↓ 0.02 MPa) es donde se genera la mayor deformación radial. Por otro lado en la trayectoria de secado ($s = 0.02$ MPa ↓ 0.15 MPa) se genera una pequeña retracción elástica del orden del 0.2 % (representado con la línea más gruesa, Fig. 6.57). En las deformaciones de colapso y de retracción desarrolladas a lo largo de la altura del espécimen, se observa un comportamiento relativamente homogéneo, mostrando el efecto que causa el emplear una compactación isótropa en la fabricación de las muestras, el cual no se presenta en muestras fabricadas con un procedimiento de compactación estática unidimensional (sin deformación lateral), lo que se ha comprobado en los ensayos de colapso realizados con el mismo equipo triaxial y representado en Barrera, *et al*, 2000.

En cuanto a la Fig. 6.54, ésta hace referencia al comportamiento mecánico en el plano $e : \omega_n-u_a$ de las dos etapas de incremento y disminución (E↓ F↓ G y H↓ I↓ J) del esfuerzo medio neto, bajo una succión constante de 0.15 MPa y 0.02 MPa respectivamente. El comportamiento hidráulico también se representa en el plano $e : u_a-u_w$ con la trayectoria de humedecimiento y secado bajo esfuerzo medio constante (C↓ D↓ E). Finalmente, en el espacio $u_a-u_w : \omega_n-u_a$ se muestra la evolución de la superficie de fluencia (LC) bajo las diferentes trayectorias de esfuerzo y succión a la que fue sometido el suelo. En la Tabla 6.12 se incluyen los valores de los parámetros usados para representar la forma y el movimiento de la curva LC; estos valores son los mismos que los empleados para exhibir el comportamiento de la curva LC en los ensayos isótropos realizados en la mini-célula isótropa.

En la Fig. 6.54 se indican los valores de los parámetros que definen la compresibilidad del suelo frente a cambios de carga y de succión. En la trayectoria de carga, bajo una succión constante mayor se presentó una respuesta ligeramente más rígida ($\zeta(0.15) = 0.080$, $\zeta(0.02) = 0.095$), comparada con la del ensayo con realizada con la mini-célula isótropa (ISO-1: $\zeta(0.2) = 0.10$). En las trayectorias de descarga, en ambas condiciones de succión matricial, el parámetro de compresibilidad de la zona elástica varió ligeramente ($\rho(0.15) = 0.006$, $\rho(0.02) = 0.008$), presentando valores mayores a los obtenidos con el ensayo ISO-1($\rho(0.2)= 0.003$) (Tabla 6.15).

Tabla 6.12 Parámetros del modelo utilizados para el análisis de los ensayos triaxiales.

$\#\xi$ (0)	$\#\#p$	$\#\#\eta\#$ (1/MPa)	r	p^c (Pa)
0.073	0.011	100	0.8	65

El esfuerzo de preconsolidación p_0 determinada por la intersección de la extrapolación lineal de la zona elástica y plástica, se presenta en el plano $s : \omega_n-u_a$, donde se observa cómo se mueve la superficie de fluencia (LC) debido a los incrementos del esfuerzo. Cuando en la trayectoria de carga (E↓ F) se alcanza el punto p_{02} , el suelo se comprime plásticamente y la superficie LC llega al punto de esfuerzo final de la trayectoria (E↓ F). En el caso de la trayectoria de carga (H↓ I), las deformaciones

irrecuperables comenzarán después de alcanzar el punto de esfuerzo p_{03} , moviendo la superficie de fluencia a la posición final (LC final H↓ I), (Fig. 6.54 y 6.55). En la Fig. 6.55 se muestra el desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) inicial en forma esquemática en una vista tridimensional en el espacio de los esfuerzos (p , q , s). Las condiciones iniciales corresponden a las generadas por el proceso de compactación en condiciones isotrópicas.

En las trayectorias de humedecimiento (C↓ D) y secado (D↓ E), presentadas en el espacio $e : u_a - u_w$ (Fig. 6.54), las primeras etapas de reducción de la succión no presentan valores significativos de entrada de agua en la muestra, mientras que en la última etapa de humedecimiento se observa una entrada de agua muy importante, generando el 80 % de la deformación de colapso medido, lo que repercute en un movimiento de la superficie de fluencia inicial. Este comportamiento es similar al del en el ensayo edométrico (EDO-1) e isotrópico (ISO-1). En la trayectoria de secado (D↓ E) se obtiene el parámetro de rigidez elástica $\rho_s = 0.001 < \rho_{s(ISO-1)} = 0.002$, y en la trayectoria (G↓ H), donde se reduce la succión, se observa una expansión muy ligera. En la Tabla 6.13 se resumen los valores de los parámetros en el ensayo. En la Fig. 6.56 se presentan los valores de los parámetros $\zeta(s)$ y ρ con respecto al cambio de succión de los ensayos edométricos e isotrópicos (mini-célula isotrópica), comparados con los obtenidos en este ensayo (célula triaxial).

Tabla 6.13 Parámetros del suelo. Ensayos de presión isotrópica. Célula triaxial.

Ensayo	$(\omega_m - u_a)_0$ MPa	p_{01} MPa	$t e / t s$ colapso	ρ_s	p_{02} MPa	$\zeta(0.15)$	$\rho(0.15)$	p_{03} MPa	$\zeta(0.02)$	$\rho(0.02)$
TISO-1	0.6	0.10	0.023	0.001	0.87	0.08	0.006	1.20	0.095	0.008

La Fig. 6.58 corresponde a la deformación radial global (κ_3) de la muestra en la trayectoria de carga-descarga (E↓ F↓ G) bajo succión constante ($s = 0.15$ MPa), donde se observa el efecto de fricción en ambos extremos de la muestra, así como el comportamiento relativamente homogéneo de las deformaciones ($\bar{\kappa}_3$). Por otro lado, en la segunda trayectoria de humedecimiento (G↓ H) (indicado el perfil con una línea más gruesa, Fig. 6.58), se presenta una recuperación elástica de la deformación radial ($\kappa_3 = 0.20$ %).

En cuanto a las Figs. 6.59 y 6.60 estas presentan los perfiles de la deformación radial en las trayectorias de carga (H↓ I) y descarga (I↓ J) respectivamente, bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.02$ MPa). Se indican las condiciones del esfuerzo medio ($\omega_m - u_a$) en las que se ha alcanzado el equilibrio en deformación. Se ha medido una compresión en la trayectoria de carga donde las deformaciones irreversibles comenzarán, después de alcanzar la superficie de fluencia en el punto de esfuerzo p_{03} moviendo la LC hasta el punto final, y una recuperación elástica en la trayectoria final del ensayo.

6.2.2.2 Comentarios finales

La célula triaxial con control de succión es un equipo adecuado para realizar ensayos isotrópicos en muestras no saturadas, que permite trabajar con presiones elevadas de confinamiento gracias a la robustez del diseño de la cámara (Fig. 3.24). Otro aspecto importante, es que posibilita manejar

succiones altas empleando la técnica de traslación de ejes, y que está limitado al valor de entrada de aire de los discos cerámicos. La célula triaxial automatizada hace factible ensayos con diferentes trayectorias de esfuerzo y succión en lapsos de tiempo largos (en este ensayo se invirtió un periodo de de 147 días continuos).

El sistema de doble drenaje presenta la ventaja de reducir el tiempo de equilibrado de las presiones intersticiales, pero tiene la desventaja de atrapar aire en el centro de la muestra haciendo difícil lograr grados de saturación elevados a succiones bajas. Al final del ensayo se ha determinado la humedad de la muestra para que pueda ser comparada con el valor calculado mediante las lecturas de los medidores de volumen del cambio de agua intersticial (Tabla 6.14).

Tabla 6.14 Contenido de agua en las muestras al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
TISO-1	12.94	13.70

Esta pequeña diferencia constata el hecho de la pérdida de agua por evaporación en ensayos largos, pero puede considerarse que el sistema de medida empleado, como en los ensayos anteriores, es apropiado para evaluar los cambios de humedad y grados de saturación del suelo durante el ensayo.

Otra ventaja y novedad de la célula triaxial con control de succión, ha sido la propuesta del sistema de medida con los sensores láser, que proporcionan lecturas fiables y estables de la deformación radial local y a lo largo de toda la altura de la muestra. Se detectó el efecto de los cabezales, así como la pequeña inclinación de la muestra, asociado al movimiento libre del cabezal superior.

El ensayo ha permitido observar los comportamientos de colapso, bajo un estado de esfuerzos isotropos, donde al decrecer la succión sobre un suelo normalmente consolidado se presenta un fenómeno de colapso debido a cambios en la macroestructura del esqueleto del suelo. Las medidas de deformación lateral han puesto de manifiesto que este colapso es isotropo. La utilización de succiones altas permite constatar que en un rango alto de succión las deformaciones asociadas al colapso son pequeñas.

6.2.3 Comparación de resultados de la Mini – célula isotropa y Célula Triaxial

En la Fig. 6.61 se presentan los resultados de los ensayos ISO-1 (mini-célula isotropa) y TISO-1 (célula triaxial), en un gráfico SWEP. En esta sección se comentará el comportamiento hidro-mecánico de ambos ensayos, ya que se ha realizado una trayectoria de esfuerzo y succión muy similar en muestras con condiciones iniciales similares en humedad y densidad, fabricadas con el mismo proceso de compactación isotropa.

Al respecto, se muestra la diferencia de la deformación volumétrica, siendo mayor la del ensayo ISO-1 (mini-célula) que la del ensayo TISO-1 (célula triaxial). En el plano de estado volumétrico (abajo-izquierda) en la trayectoria de humedecimiento, la variable de estado volumétrico cruza las líneas de

igual grado de saturación con una pendiente mayor para el ensayo ISO-1, que se manifiesta en un fenómeno de colapso más grande. En la Fig. 6.62 se aprecian las curvas de la deformación volumétrica (κ_v), relación de agua (e_w) y grado de saturación (e_w/e) con respecto a los cambios de succión matricial. Se observa que a succiones altas no se presentan importantes cambios de volumen, concentrándose la mayor deformación de colapso a succiones bajas, y que las variaciones en la relación de agua (e_w), en ambos ensayos presentan un comportamiento muy similar, no obstante que los cambios en el grado de saturación (e_w/e) son algo mayores para el ensayo ISO-1.

En la primera etapa de compresión realizada con la mini-célula isótropa (trayectoria B↘ C, Fig. 6.61) muestra una respuesta con una mayor compresibilidad (compresibilidad asociada a la muestra y compresibilidad del sistema). Dicha compresibilidad del sistema se debe a los acomodos iniciales de la membrana a la muestra y la compresibilidad inicial del líquido confinante, a pesar de la etapa de desaeración inicial. Una vez estabilizada la presión confinante, la respuesta del suelo en trayectorias de humedecimiento y secado es totalmente comparable con la respuesta obtenida con el equipo triaxial (trayectoria C↘ D↘ E, Fig. 6.62). Las etapas posteriores de carga y descarga, realizadas a una mayor presión de confinamiento y menos susceptibles a dichos acomodos, no evidencian la influencia de la compresibilidad del sistema, por lo que los resultados son comparables con los del equipo triaxial (trayectoria E↘ F↘ G, Fig. 6.63).

En la Fig. 6.63 se presentan los parámetros en ambos ensayos, tras una proceso hidráulico (en el plano $e : s$), y un proceso mecánico (en el plano $e : \omega_m - u_a$), midiendo valores de parámetros muy similares. En la Tabla 6.15 y Fig 6.56 se comparan los parámetros de los ensayos isótropos, así como los parámetros obtenidos en términos de esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$), del ensayo edométrico EDO-1.

Tabla 6.15 Parámetros de compresibilidad en ensayos isótropos y edométricos.

Ensayo	($u_a - u_w$) MPa	$\zeta\#$	$\rho\#$	ρ_s
EDO-1 *	0.3	0.084	0.002	0.002
	0.05	0.12	0.002	
ISO-1	0.2	0.10	0.003	0.002
TISO-1	0.15	0.08	0.006	0.001
	0.02	0.095	0.008	

* para el ensayo edométrico los parámetros fueron obtenidos en términos de esfuerzo vertical neto ($\omega_v - u_a$).

6.3 Resultados triaxiales con control de succión

6.3.1 Introducción

Se reportan los resultados experimentales en el estudio del comportamiento hidromecánico de la arcilla durante la aplicación de un desviador. El programa de ensayos se enfocó al estudio del comportamiento hidromecánico, así como a la determinación de parámetros de resistencia al corte y al análisis de la respuesta mecánica esfuerzo-deformación del suelo, ya que pocos estudios experimentales se han enfocado al acoplamiento hidromecánico durante la etapa de corte (Rampino, *et al*, 1999; Rampino, *et al*, 2000; Wheeler & Sivakumar, 2000). Por otro lado, se han reportado pocos resultados experimentales en cuanto a la evolución de la deformación axial y radial de forma local y global durante la etapa de corte.

El trabajo experimental consistió en diferentes tipos de ensayos de corte, bajo deformación controlada y bajo una succión matricial constante relativamente alta. Se analizaron muestras normalmente consolidadas (NC) y sobreconsolidadas (OC). El estado sobreconsolidado fue inducido por diferentes mecanismos previos a la etapa de corte. Se utilizó un proceso mecánico de carga–descarga isótropa a succión constante y un proceso hidráulico en ciclos de cambios de succión (humedecimiento–secado) bajo esfuerzo medio neto constante, con una deformación de colapso dominante. Otro mecanismo de sobreconsolidación fue imponer un elevado incremento–disminución de la succión total en condiciones libres de expansión y retracción. Las muestras normalmente consolidadas se estudiaron a un nivel de esfuerzo medio neto igual al máximo que haya experimentado la muestra bajo succión constante y también en otras muestras después de un fenómeno de colapso previo.

6.3.2 Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IS

En el grupo de ensayos IS, la rotura y las fases de carga (y descarga si se aplica) se realizan a una misma succión de 0.8 MPa. En la Tabla 6.16 se indican los valores del estado inicial de las muestras ensayadas, presentando aproximadamente los mismos valores, y en la Fig. 5.10 se representan en el plano Próctor. La nomenclatura para identificar los diferentes ensayos fue de acuerdo con una descripción general de la trayectoria seguida. La primera letra indica la etapa de compresión isótropa (I); la segunda letra, la etapa de corte (S : shearing), y las dos últimas la condición de la muestra antes de la etapa de corte (NC : normalmente consolidada o OC: sobreconsolidada), finalmente el número hace referencia al esfuerzo radial durante la fase de corte.

Tabla 6.16 Condiciones iniciales de las muestras ensayadas. Grupo IS.

Ensayo	W_0 %	ψ_{d0} g/cm ³	e_0	Sr_0 (%)	Φ # MPa	$\omega_m - u_a$ MPa
IS – OC – 03	110.2	1.67	0.625	47.7	0.8	0.6
IS – NC – 06	110.2	1.67	0.623	47.9	0.8	0.6
IS – NC – 12	110.2	1.66	0.629	47.4	0.8	0.6
IS – OC – 06	110.2	1.66	0.629	47.4	0.8	0.6

$\omega_m - u_a$: esfuerzo medio neto de compactación estática en condiciones isótropas; Φ : succión total inicial.

6.3.2.1 Etapa de compresión isótropa

La trayectoria de esfuerzo para cada uno de los ensayos se describe en detalle en la sección 5.5.1. La evolución del índice de poros y del comportamiento hidráulico durante la compresión isótropa (trayectoria A \downarrow B, Fig. 6.64, 6.65) muestra un comportamiento similar a los ensayos isótropos (sección 6.2.2).

En el ensayo IS-OC-03, en la etapa de compresión isótropa, el esfuerzo máximo alcanzado ($\omega_m - u_a = 0.3$ MPa) fue menor a la obtenida durante el proceso de compactación ($\omega_m - u_a = 0.6$ MPa), con el propósito de analizar la rotura de una muestra sobreconsolidada. Para el ensayo ISO-NC-06 el esfuerzo medio neto fue el mismo que en el proceso de compactación ($\omega_m - u_a = 0.6$ MPa). En el ensayo ISO-NC-12, el esfuerzo medio neto máximo fue de $\omega_m - u_a = 1.2$ MPa (Fig. 6.64). En el ensayo IS-OC-06 se realizó un

ciclo de carga–descarga isótropa bajo succión constante proporcionando un estado sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar con la etapa de corte (trayectoria A↘ B↘ C, Fig. 6.65). La trayectoria de carga (A↘ B) fue suficientemente extendida (hasta $\omega_m-u_a = 1.6$ MPa) con la finalidad de causar un desplazamiento de la superficie de fluencia (LC), (Figs. 6.65, 6.77). Los incrementos del esfuerzo medio neto se aplicaron en incrementos iguales $\Delta(\omega_m-u_a) = 0.2$ MPa, donde cada uno se mantuvo aproximadamente por 48 horas controlando la deformación volumétrica hasta su equilibrio; por otro lado, se consideraron suficientemente pequeños como para poder evitar cambios de succión (disminución) importantes en la etapa inicial de carga.

Las Figs. 6.64 y 6.65 presentan los resultados de los ensayos IS-NC-12 y IS-OC-06 correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en términos del índice de poros (e), deformación volumétrica (κ_v), contenidos de agua (e_w) y grados de saturación (e_w/e) con respecto a los cambios del esfuerzo medio neto (ω_m-u_a). Se observa en la etapa de carga una reducción del índice de vacíos, lo que implicaría un aumento en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), pero debido a la expulsión de agua el grado de saturación permanece prácticamente constante. Por otro lado, en ambas figuras se observa el comportamiento elastoplástico ya constatado en los ensayos de carga isótropa descritas en los apartados anteriores. En la Fig. 6.65, correspondiente al ensayo IS-OC-06, se observó un valor menor de $\rho = 0.003$ en la trayectoria de carga (A-B) que en la trayectoria de descarga ($\rho = 0.007$), (B-C). En el caso del parámetro de compresibilidad de las muestras del ensayo IS-NC-12, se detectó una respuesta ligeramente más rígida ($\rho = 0.003$).

En los ensayos IS-NC-12 y IS-OC-06 (Figs. 6.64 y 6.65) se comprueba que el esfuerzo de preconsolidación inicial (p_0) es la obtenida tras la compactación isótropa. Cuando en la trayectoria de carga (A-B) alcanza la superficie de fluencia inicial en el punto (p_0), el suelo comienza a generar deformaciones plásticas; por lo tanto, la superficie de fluencia se desplaza al final de la trayectoria A-B (Fig. 6.75 y 6.77). Este comportamiento fue consistente con el modelo propuesto por Alonso, *et al* (1990). En la Fig. D.15 del Anexo D, se presenta el perfil de las deformaciones laterales en la trayectoria de carga para el ensayo IS-OC-06.

6.3.2.2 Etapa de rotura

Los cuatro ensayos del grupo IS, de compresión triaxial a una velocidad de deformación axial constante de $v_q = 1.0$ σ m/min, se realizaron bajo una succión matricial (u_a-u_w) = 0.8 MPa y presión de cámara neta (ω_m-u_a) constante. En las Fig. 6.66, 6.67, 6.68 y 6.69, se resumen los resultados durante la etapa de compresión triaxial de los ensayos IS-NC-06, IS-NC-12, IS-OC-03 y IS-OC-06, respectivamente. La evolución del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), así como los cambios de la relación de agua (e_w), y grado de saturación (e_w/e) con respecto a la deformación axial (κ_l) muestran el acoplamiento hidromecánico y la respuesta esfuerzo-deformación. Durante la etapa de corte se registraron continuamente las medidas locales de la deformación axial (κ_l) y radial (κ_{lc}) en el centro de la muestra. No obstante, a predeterminados intervalos se obtuvieron las deformaciones radiales globales (κ_s) de los perfiles de la deformación lateral, los cuales se determinaron por medio de los sensores láser (Fig. 6.71). Las deformaciones volumétricas (κ_v) y de corte (κ_s) de forma global, así como el valor del grado de saturación (e_w/e) se representan en los gráficos por una línea continua con símbolos (círculos), donde cada uno corresponde a los diferentes intervalos que fueron seleccionados para medir la deformación radial del perfil de la muestra. Se

observa que la principal diferencia entre la deformación global y local, y el efecto en los cambios del grado de saturación, comienza a una deformación axial mayor de $\kappa = 5\%$; mientras que para el ensayo IS-OC-03 serán después del $\kappa = 9\%$. Los cambios en el grado de saturación son más representativos cuando se consideran las deformaciones radiales globales.

La evolución de las curvas esfuerzo desviador/deformación axial (Fig. 6.66 - 6.69) crece en forma monótona a un valor asintótico, sin presentar evidencia de un pico, fallando las muestras por abarrilamiento (Fig. 6.71). Para los ensayos con muestras normalmente consolidadas (IS-NC-06 y IS-NC-12) las curvas esfuerzo-deformación (Fig. 6.66 y 6.67) tienden a seguir una respuesta normalmente consolidada, donde no hay un apreciable punto de fluencia, generando deformaciones plásticas desde el inicio del corte. El ensayo IS-NC-12 (Fig. 6.67), donde la presión neta de confinamiento fue de $(\omega_s - u_a) = 1.2$ MPa, el esfuerzo desviador alcanzó un mayor valor para conseguir el estado crítico. En las Fig. 6.73 y 6.75 se presentan la posición de la muestra antes de comenzar con la etapa de corte para los ensayos IS-NC-06 y IS-NC-12 respectivamente, donde la muestra se encuentra sobre la superficie de fluencia (punto B). Cuando la etapa de corte comienza, únicamente se generaran deformaciones plásticas de corte hasta un punto C de la línea de estado crítico. En todos los ensayos se efectuó un ciclo de descarga-recarga a una deformación axial entre $\kappa = 1$ y 2% , para los parámetros elásticos del suelo.

Los ensayos se analizaron en un contexto elastoplástico de estado crítico desarrollado por Alonso *et al.* (1990). El tamaño de la superficie de fluencia inicial, indicadas en las Fig. 6.73, 6.75 y 6.77 como LC (inicial), se define por el proceso del esfuerzo de compactación $p = \omega_n - u_a = 0.6$ MPa y la succión inicial $s = u_a - u_w = 0.8$ MPa. Los ensayos con muestras sobreconsolidadas (IS-OC-03 y IS-OC-06) mostraron una evolución quasi-lineal en una primera etapa, y posteriormente las deformaciones plásticas. La forma de las curvas esfuerzo-deformación nos indica la localización de la superficie de fluencia. En la Fig. 6.76 se muestra el punto de fluencia en el comportamiento de corte, obtenido de las curvas en los planos $e : (\omega_n - u_a)$ y $q : \kappa$ con un valor de $p_{01} = 0.89$ MPa. En el ensayo IS-OC-06 (Fig. 6.69) la curva presenta una respuesta más rígida antes de tocar el punto de fluencia (p_{01}) hasta un valor por encima de $q = 0.81$ MPa. Este comportamiento es consistente con la trayectoria de esfuerzo elástica inicial dentro de la LC (inicial), la cual fue arrastrada por la trayectoria de compresión isótropa (A-B).

En la Fig. 6.77 se observa cómo se mueve la superficie LC (inicial). Una vez que la trayectoria de carga isótropa (A-B) alcanza el punto de fluencia (p_0), el suelo se comprime plásticamente y la superficie de fluencia LC se desplaza al punto de esfuerzo final de la trayectoria de carga isótropa. En los ensayos donde la etapa de compresión triaxial se realizó a una presión de cámara constante de $(\omega_s - u_a) = 0.6$ MPa (IS-NC-06 y IS-OC-06), la variable q logra estabilizarse a un mismo valor de $q = 1.76$ MPa (OC) y $q = 1.74$ MPa (NC), respectivamente (Fig. 6.70).

En los ensayos, el volumen de las muestras decrece en forma monótona durante la etapa de corte. Este comportamiento contractante cesa a partir de una deformación axial mayor de $\kappa > 13\%$, salvo para el ensayo IS-OC-06 que fue a $\kappa > 8\%$. Dicho comportamiento también se detectó en las deformaciones volumétricas obtenidas de forma global. A partir de las cuales hubo un comportamiento dilatante hasta el final de cada ensayo en las medidas locales y globales, sin presentar en la curva deformación / desviador ningún signo de reblandecimiento. Este comportamiento también ha sido reportado por Charles W & Abraham (2001). No obstante, al final de la falla el volumen del suelo permaneció

constante. Todo indica que las variables de estado p , q , y e , se estabilizan alcanzando un estado crítico (Fig. 6.70).

En las Fig. 6.66-6.69, se constata el comportamiento hidráulico, donde las muestras expulsan agua durante la etapa de corte hasta llegar a un valor estable. Rampino, *et al* (2000) observó que los suelos llevados a corte expulsaban agua durante la compresión y absorbían agua durante la dilatancia. En el caso de los ensayos presentados, en la etapa durante el comportamiento dilatante, no se observó este fenómeno.

En la Fig. 6.71 presenta el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra durante la etapa de corte del ensayo IS-NC-06. También se muestran las deformaciones radiales globales indicadas con líneas discontinuas y las deformaciones axiales acumuladas del ensayo. La forma de abarrilamiento de la muestra señala que la determinación del grado de saturación de forma local es menos representativa que la global. En el Anexo D, en las Fig. D.16, D.17 y D.18 se encuentra el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra de los ensayos IS-NC-12, IS-OC-03 y IS-OC-06 respectivamente.

En cuanto a las Figs. 6.73, 6.75 y 6.77 éstas señalan las trayectorias de esfuerzos y el desplazamiento de la superficie de fluencia (LC), así como los vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas de los ensayos IS-NC-06, IS-NC-12 y IS-OC-06, respectivamente. Los parámetros elásticos se evaluaron de la trayectoria de descarga (Fig. 6.66 - 6.69). La dirección del vector de deformaciones plásticas ($\iota \kappa^p$) evoluciona cambiando gradualmente durante la etapa de corte, partiendo de una dirección horizontal con únicamente la componente de las deformaciones volumétricas plásticas ($\iota \kappa_v^p$), y los incrementos de las deformaciones plásticas de corte nulos ($\iota \kappa_s^p \mid 0$); gradualmente alcanza el estado crítico donde $\iota \kappa_v^p \mid 0$, existiendo únicamente la componente vertical ($\iota \kappa_s^p$). Las deformaciones volumétricas elásticas e inelásticas de corte inducidas por los esfuerzos (p , q) dentro de la superficie de fluencia, están dadas por:

$$d\kappa_v^e \mid \frac{\rho}{v} \frac{dp}{p} \quad (6.3)$$

$$d\kappa_s^e \mid \frac{dq}{3G} \quad (6.4)$$

Para calcular las deformaciones volumétricas plásticas y deformaciones plásticas de corte, se tomaron los valores de los parámetros elásticos del suelo de cada ensayo (Fig. 6.95-6.97). En la Tabla 6.19 se resumen los parámetros del suelo obtenidos.

En las Fig. 6.72 y 6.74 se muestran las deformaciones volumétricas plásticas ($\iota \kappa_v^p$) y las deformaciones plásticas de corte ($\iota \kappa_s^p$) con respecto al esfuerzo medio neto ($\sigma_m - u_a$) para los ensayos con muestras normalmente consolidadas. Se observa cómo las deformaciones plásticas de corte se incrementan gradualmente y las volumétricas disminuyen gradualmente hasta un valor nulo. En dichas figuras se aprecia la variación en la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas ($\iota \kappa_v^p / \iota \kappa_s^p$) como una función del esfuerzo medio neto ($p = \sigma_m - u_a$). Para una mejor claridad se filtraron los datos experimentales.

Para estas muestras que presentan una historia de esfuerzos isotrópico, la dirección de los vectores de incremento de la deformación plástica son razonables, asumiendo una regla de flujo asociada y una superficie de fluencia (simétrica / elíptica) para una succión constante (Alonso, *et al*, 1990). Por otro lado, el incremento de volumen en algunas etapas de los ensayos introduce componentes horizontales negativas en los vectores de incremento de la deformación plástica, pero al final de la etapa de rotura, la dirección de los vectores es vertical.

6.3.3 Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IWS

Se presentan los resultados de los ensayos de compresión triaxial del grupo IWS. En la sección 4.3.2 se detalla la fabricación de las muestras (esfuerzo controlado) y en la Tabla 6.17 y Fig. 5.10 se indica el estado inicial de las muestras. La nomenclatura para identificar los ensayos fue de acuerdo con una descripción general de la trayectoria realizada. La primera letra se refiere también a la etapa de compresión isotrópica (I); la segunda indica que se realizaron cambios de succión (W); la tercera hace referencia a la etapa de corte (S); la cuarta y quinta letras denotan la condición de la muestra antes de la etapa de corte (normalmente consolidada o sobreconsolidada); el número corresponde al valor máximo o mínimo de succión a la que se somete a la muestra en el ensayo.

Tabla 6.17 Condiciones iniciales de las muestras. Grupo IWS.

Ensayo	w ₀ %	ψ ₀ g/cm ³	e ₀	Sr ₀ (%)	..# MPa	ω _m - u _a MPa
IWS – OC – 87	110.2	1.67	0.622	47.9	0.8	0.6
IWS – OC – 01	110.2	1.67	0.624	47.8	0.8	0.6
IWS – NC – 02	110.2	1.65	0.644	46.3	0.8	0.6

Las trayectorias en los ensayos del grupo IWS se puede resumir de la siguiente manera (en la sección 5.5.1 se detallan los procedimientos y las trayectorias seguidas).

Inicialmente, en el ensayo IWS–OC–87 se impuso una succión total (Φ) aproximada de 87 MPa mediante una disolución salina saturada dentro de un sistema termodinámicamente cerrado (ver Fig. 5.18). Después de 30 días (tiempo de equilibrio) se montó la muestra en la célula triaxial, imponiendo unas condiciones iniciales de esfuerzo y succión matricial. Las deformaciones volumétricas sufridas por la muestra en el ciclo de secado, se midieron con ayuda de un calibrador (midiendo el diámetro y la altura en varios puntos referenciados de la muestra). Posteriormente la muestra se sometió a una trayectoria de carga isotrópica bajo succión matricial constante. Finalmente, se desarrolló la etapa de corte en la muestra ligeramente sobreconsolidada (estado dado por la imposición de la succión total Φ = 87 MPa).

Para el ensayo (IWS–OC–01) se realizó un ciclo de humedecimiento–secado, bajo esfuerzo medio neto constante (ω_n-u_a)= 0.6 MPa al finalizar la etapa de compresión isotrópica, dando un estado ligeramente sobreconsolidado a la muestra antes de comenzar la etapa de corte. En el ensayo IWS–NC–02 la muestra se sometió a una trayectoria de carga isotrópica, continuando con una trayectoria de humedecimiento hasta una succión s = 0.02 MPa, donde finalmente se realizó la etapa de corte.

6.3.3.1 Etapa de compresión isótropa

En este grupo de ensayos, el estado sobreconsolidado y normalmente consolidado de las muestras antes de la etapa de corte, se indujo por un proceso hidráulico; mientras que en los ensayos del grupo IS, el estado de la muestra se generó por uno mecánico.

Los incrementos del esfuerzo medio neto se aplicaron por etapas en incrementos iguales $\Delta(\sigma_n - u_a) = 0.2$ MPa; cada uno se mantuvo aproximadamente por 48 horas controlando la deformación volumétrica hasta su equilibrio, y manteniendo la condición de succión constante.

En las Fig. 6.78, 6.79 y 6.80 en el plano $e : \sigma_n - u_a$, se observa que en la etapa de carga isótropa (A-B) máxima alcanzada fue de $(\sigma_n - u_a) = 0.6$ MPa, que es el mismo esfuerzo impuesto a la muestra durante el proceso de compactación. En la Fig. 6.78 se detecta que durante esta etapa de compresión isótropa para el ensayo IWS-OC-87, prácticamente no sufre cambios en el contenido de agua y el grado de saturación. De esta trayectoria (A-B) realizada en los ensayos, se obtuvieron los siguientes valores del parámetro de compresibilidad en el rango elástico $\rho_{(IWS-OC-87)} = 0.0063$, $\rho_{(IWS-OC-01)} = 0.0043$ y $\rho_{(IWS-NC-02)} = 0.0054$, siendo estos valores consistentes con los parámetros obtenidos de los ensayos del grupo IS.

6.3.3.2 Etapa de cambio de succión

En la Fig. 6.78 se considera el cambio de volumen de la muestra del ensayo IWS-OC-87 al ser sometida a una succión total de $\Phi = 87$ MPa. Según el modelo elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990), un incremento en la succión puede inducir deformaciones irreversibles. La succión (s_0) puede definirse como el valor de succión más elevado al que ha estado sometido en toda su historia el suelo para un cierto valor del esfuerzo esférico, en forma tal que, cuando la succión aplicada sobrepasa este valor surgen deformaciones permanentes o irreversibles. Este valor de succión (s_0), es la frontera de la transición del estado elástico al rango virgen cuando la succión se incrementa; esta frontera se denomina SI.

También se observa que la deformación volumétrica al someter la muestra a un secado, bajo una succión total de $\Phi = 87$ MPa es del orden de $\kappa_s = 2.28$ %. Cuando la muestra se somete a una succión matricial ($u_a - u_w$) = 0.8 MPa dentro de la célula triaxial, se genera un hinchamiento que recupera una deformación volumétrica de $\kappa_v = -1.79$ %, (en la Fig. D.25 del Anexo D se muestra la evolución temporal de esta etapa). En este proceso de secado-humedecimiento se generarán unas deformaciones irreversibles del orden de $\kappa_v^p = 0.5$ %. En la Fig. 6.81b se muestra el movimiento de la superficie de fluencia LC (inicial), ocasionado por el desplazamiento de la superficie SI, que desarrolla deformaciones irreversibles. La superficie de fluencia inicial indicada como LC (inicial), se definió por el proceso de compactación ($\sigma_n - u_a = 0.6$ MPa). Este cambio de succión, en condiciones libres de retracción, definió el estado sobreconsolidado de la muestra antes de la etapa de corte.

En las Fig. 6.79 y 6.80 aparecen los resultados de los ensayos IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente, en un diagrama SWEP que representa la trayectoria de compresión isótropa y de cambio de succión matricial. La trayectoria de esfuerzos en los ensayos se resume de la siguiente manera (descrita a detalle en 5.5.1).

Inicialmente, las muestras se sometieron a una trayectoria de carga isotrópica hasta un esfuerzo medio neto igual a la de compactación ($\omega_m - u_a$) = 0.6 MPa. Se continuó con una trayectoria de humedecimiento (B↓ C), bajo esfuerzo medio neto constante ($\omega_m - u_a$), que se llevó a cabo manteniendo la presión de aire constante ($u_a = 0.9$ MPa) y controlando la presión de agua (u_w). Las trayectorias de humedecimiento se realizaron en etapas hasta un valor de ($u_a - u_w$) = 0.01 MPa y 0.02 MPa para los ensayos IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente. En el caso del ensayo IWS-NC-02; se continuó con la etapa de corte sobre la muestra normalmente consolidada bajo este valor de succión.

En el ensayo IWS-OC-01 se prosiguió con una trayectoria de secado hasta un valor de 0.8 MPa (C↓ D), imponiendo a la muestra un estado sobreconsolidado antes de comenzar con la trayectoria de corte. En el Anexo D, se muestra en las figuras D.26–D.31 los resultados de los ensayos IWS-OC-01 y IWS-NC-02, presentando la evolución temporal del fenómeno de colapso producido en la última etapa de humedecimiento, así como los resultados correspondientes a las diferentes etapas de equilibrio en cada cambio de succión matricial y los perfiles de la deformación radial global en la trayectoria de humedecimiento.

En las Fig. 6.79 y 6.80, en el plano de las variables de estado volumétrico (abajo–izquierda), se observa que en el proceso de humedecimiento (B↓ C) se desarrollan cambios en el grado de saturación ($S_r = e_w/e$), donde la trayectoria de estado volumétrico ($v_e/v_{ew} = -0.68$ y -0.61) cruza casi perpendicularmente las líneas de igual grado de saturación. Este aumento se asocia con la ocurrencia de un proceso irre recuperable en la deformación volumétrica, debido a un colapso del esqueleto del suelo (abajo–derecha, Fig. 6.79, 6.80). En el ensayo IWS-OC-01 (Fig. 6.79), en la trayectoria de humedecimiento se generó una deformación volumétrica $\kappa_c = 2.8$ %, y otra por retracción en la trayectoria de secado de $\kappa_c = 0.8$ %; mientras que en el ensayo IWS-NC-02 (Fig. 6.80) la deformación volumétrica total en la trayectoria de humedecimiento fue de $\kappa_c = 2.98$ %. Las deformaciones volumétricas reportadas se calcularon basándose en la deformación radial medida en la zona central del espécimen.

El comportamiento del suelo en los ensayos se analizó dentro del contexto del modelo elastoplástico desarrollado por Alonso, *et al*, 1990, inspirado en conceptos de estado crítico. El tamaño de la superficie de fluencia inicial (Fig. 6.83 y 6.84) LC (inicial) y la succión matricial inicial se definió por el proceso de compactación ($\omega_m - u_a = 0.6$ MPa y $s = 0.8$ MPa). Esta superficie permaneció quieta durante la primera etapa de compresión isotrópica en los ensayos triaxiales (trayectoria, A-B). La reducción de la succión (B-C) indujo una reducción del volumen con importantes deformaciones volumétricas irreversibles (fenómeno de colapso), por lo que la LC (inicial) se desplazó (Fig. 6.83-6.84) hasta el punto de esfuerzo (p_{01}). En la Tabla 6.12 se presentan los valores de los parámetros usados para representar la forma y el movimiento de la curva LC; estos valores son los mismos que los empleados para exhibir el comportamiento de la curva LC de los ensayos isotrópicos comentados anteriormente.

En el caso del ensayo (IWS-NC-02), la etapa de corte comenzó en el punto de esfuerzo sobre la superficie de fluencia ($s = 0.02$ MPa y $p_{01} = 0.6$ MPa) en una muestra normalmente consolidada, donde las deformaciones plásticas ocurrirán al empezar la etapa de corte (C-D), (Fig. 6.84). Por otro lado, el ensayo (IWS-OC-01) continuó con una trayectoria de secado (C-D), que indujo cierta retracción, donde la LC (inicial) se mantuvo sin cambios. La etapa de corte en el punto de esfuerzo ($s = 0.8$ MPa y $p_0 = 0.6$ MPa) comenzó en un estado sobreconsolidada. En la etapa inicial de la fase de corte sólo se

desarrollarán deformaciones elásticas. Una vez que se encuentra la superficie de fluencia desplazada por el fenómeno de colapso, ocurrirán las deformaciones plásticas (Fig. 6.83).

6.3.3.3 Etapa de rotura

Los ensayos de compresión triaxial del grupo IWS se realizaron en muestras sobreconsolidadas (IWS-OC-87 y IWS-OC-01) y en muestras normalmente consolidadas (IWS-NC-02) bajo una variación de deformación constante de $v_q = 1.0 \text{ } \sigma\text{m/min}$ a presión de cámara neta de $\omega_b - u_a = 0.6 \text{ MPa}$ y succión matricial constante de $s = 0.8 \text{ MPa}$ para las muestras sobreconsolidadas, y $s = 0.02 \text{ MPa}$ para las normalmente consolidadas. En las Figs. 6.85, 6.86 y 6.87 se resumen los resultados durante la etapa de compresión triaxial de los ensayos IWS-OC-87, IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente. La evolución del esfuerzo desviador (q), deformación de corte (κ_s), deformación volumétrica (κ_v), así como los cambios en la relación de agua (e_w) y grado de saturación (e_w/e), muestran la respuesta esfuerzo-deformación, así como el acoplamiento hidro-mecánico.

El registro de las deformaciones axial (κ_l) y radial (κ_r) se realizó de igual manera que en los ensayos del grupo IS, con mediciones continuas (deformaciones locales) y mediciones en predeterminados intervalos (deformaciones globales). En las Figs. 6.85, 6.86 y 6.87 las deformaciones globales corresponden a una línea continua con símbolos, donde cada uno corresponde a los diferentes intervalos seleccionados para medir las deformaciones laterales. Se observa que en la muestra normalmente consolidada (Fig. 6.87) se presenta una mayor diferencia entre la deformación global y local y el efecto en los cambios del grado de saturación. En las muestras sobreconsolidadas, esta diferencia se aprecia en una deformación axial mayor de $\kappa_l = 2 \%$. La Fig. 6.88 presenta el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales del perfil de la muestra durante la etapa de corte del ensayo IWS-OC-01, indicando la deformación radial global con líneas discontinuas y la deformación axial acumulada. Se incluyen las deformaciones laterales durante la segunda etapa de descarga y recarga a una deformación axial del orden de 12 %, además se muestra claramente la restricción del desplazamiento lateral que impone el cabezal rugoso. En el Anexo D en las Fig. D.19 y D.20 se muestra el desarrollo progresivo de las deformaciones laterales de los perfiles de las muestras de los ensayos IWS-OC-87 y IWS-NC-02, respectivamente.

En las Figs. 6.85-6.87 muestran también la curva esfuerzo–deformación ($q:\kappa_l$). En las curvas se observa cómo el desviador crece monótonamente a un valor asintótico sin presentar evidencia de un pico. En la muestra normalmente consolidada, la curva esfuerzo–deformación tiende a seguir una respuesta normalmente consolidada donde no aparece un punto de fluencia, generando deformaciones plásticas desde el comienzo de la etapa de corte. En los ensayos con muestras sobreconsolidadas se encuentran que inicialmente presentan una mayor rigidez con un desviador que crece de forma cuasi-lineal, continuando con unas deformaciones que inducen endurecimiento.

En la Fig. 6.89, se presenta el comportamiento esfuerzo–deformación para muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas bajo un esfuerzo neto de cámara constante ($\omega_b - u_a = 0.6 \text{ MPa}$) y succión constante ($u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$). Las variables de estado p , q , y e se estabilizan, alcanzando un estado crítico, y en las Fig. 6.87 y 6.89 se observa que la respuesta del suelo es dependiente de la succión. Un incremento de la succión tiene un efecto sobre las propiedades mecánicas del material, incrementando

tanto la rigidez como la resistencia al corte. En todos los casos se efectuó un ciclo de descarga–recarga a una deformación axial entre $\kappa_f = 1\%$ y 2% , para obtener los parámetros elásticos del suelo.

El comportamiento volumétrico de las muestras presentó el mismo fenómeno que en los ensayos del grupo IS, en donde la deformación volumétrica decrece monótonamente en la etapa de corte. Este comportamiento contractante cesa a partir de una deformación axial mayor del 6% , con excepción de la muestra normalmente consolidada que fue a una $\kappa_f > 13\%$. Se detectó un comportamiento volumétrico dilatante hasta el final de cada ensayo, tanto en las deformaciones volumétricas locales como globales, sin presentar evidencia de reblandecimiento del suelo. En la Fig. 6.89 se observa que la muestra, bajo una succión matricial menor presenta un comportamiento contractante mayor, como era de esperar.

Las Figs. 6.85 y 6.86 de los ensayos IWS-OC-87 y IWS-OC-01 respectivamente, hacen alusión al comportamiento hidráulico, donde las muestras expulsaron agua durante la fase de corte hasta llegar a un valor estable. Por otro lado, en el ensayo IWS-NC-02 donde la muestra llega a la rotura bajo una succión matricial menor ($s = 0.02$ MPa), se encuentra que en la etapa inicial entra agua a la muestra y posteriormente la expulsa hasta llegar a un valor estable. En todos los ensayos de compresión triaxial se ha observado que al final de la etapa de corte la muestra deja de expulsar agua hasta alcanzar un valor estable. No se presentó evidencia experimental de entrada de agua en la etapa dilatante final.

En las Fig. 6.81a y 6.82, se muestra cómo se obtiene el punto de fluencia en la etapa de corte de las muestras sobreconsolidadas, a través de las curvas en el espacio $e : (a_n - u_a)$ y $q : \kappa_f$. Las muestras presentan una respuesta más rígida antes de tocar el punto de fluencia (p_{01}) a un valor por encima de $q - 0.34$ MPa para el ensayo IWS-OC-87 y de $q - 0.48$ MPa para el ensayo IWS-OC-01. Las deformaciones volumétricas elásticas ($\iota \kappa_v^e$) y deformaciones elásticas de corte ($\iota \kappa_s^e$) inducidas por los esfuerzos $p : q$, se calcularon de acuerdo con las ecuaciones 6.7 y 6.8. En las Figs. 6.81b, 6.83 y 6.84 se aprecia la trayectoria de esfuerzos, el movimiento de la superficie de fluencia, así como los vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas de los ensayos IWS-OC-87, IWS-OC-01 y IWS-NC-02, respectivamente. La dirección de los vectores cambia gradualmente, de una posición prácticamente horizontal ($\iota \kappa_s^p \parallel 0$) hasta una dirección vertical ($\iota \kappa_v^p \parallel 0$). Para estas muestras, que presentan una historia previa de esfuerzos isotropo, la dirección de los vectores es razonablemente predicha asumiendo una regla de flujo asociada y una superficie de fluencia (simétrica / elíptica) a succión constante (Alonso, *et al*, 1990).

Por su parte, las Fig. D.21, D.22 y D.23 del Anexo D, hacen ver las deformaciones volumétricas plásticas ($\iota \kappa_v^p$), las deformaciones plásticas de corte ($\iota \kappa_s^p$) y la variación en la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas ($\iota \kappa_v^p / \iota \kappa_s^p$) con respecto al esfuerzo medio neto ($a_n - u_a$) para los ensayos del grupo IWS.

En la Tabla 6.19 se incluyen los parámetros del suelo, donde se puede observar la influencia de la succión matricial sobre los parámetros elásticos en muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas.

6.3.4 Líneas de estado crítico

Los puntos de la línea de estado crítico se obtuvieron del valor máximo alcanzado en el espacio ($q : \kappa_j$). En la Fig. 6.90 se muestra en el espacio esfuerzo medio neto–esfuerzo desviador ($p : q$) la línea de estado crítico aproximada de los ensayos IS-OC-03, IS-NC-06 y IS-NC-12.

Alonso, *et al* (1990), en la ecuación 6.5, asume que el esfuerzo del suelo está linealmente relacionada con la succión y el esfuerzo medio neto:

$$q = M p + M k s \quad (6.5)$$

Donde M es la pendiente de la línea de estado crítico para suelos saturados, y k una constante. Wheeler & Sivakumar (1995), modificaron la ecuación 6.5 a partir de datos experimentales por la expresión siguiente:

$$q = M(s) p + \sigma(s) \quad (6.6)$$

Donde $M(s)$ es la pendiente de la línea de estado crítico, que puede variar con la succión y $\sigma(s)$ es el incremento no lineal con la succión. En la Fig. 6.91 se muestra la línea de estado crítico para los ensayos con los mismos valores de succión ($s = 0.8$ MPa) y la línea de estado crítico de los ensayos triaxiales en muestras saturadas (CD-103), donde el valor de la pendiente M fue el mismo. Por lo tanto, se puede concluir de estos ensayos que el valor de M no tiene una alta dependencia con la succión. Los parámetros de la línea de estado crítico de la pendiente (M) y del intercepto $\sigma(s)$ fueron:

$$\begin{aligned} M (s = 0.8 \text{ MPa}) &= 1.154 \\ \sigma (s = 0.8 \text{ MPa}) &= 0.39 \text{ MPa} \end{aligned}$$

El ángulo de fricción (λ') se derivó de 6.7, partiendo de que el valor de M es constante, obteniendo un valor del ángulo de fricción de $\lambda' = 28.94^\circ$

$$\text{sen} \lambda' = \frac{3 M}{6.2 M} \quad (6.7)$$

La función de fluencia para la siguiente familia de elipses en el espacio de los esfuerzos (p, q, s) está dada por la siguiente expresión (Alonso, *et al*, 1990):

$$q^2 - M^2 (p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (6.8)$$

Donde p es el esfuerzo medio neto; q el esfuerzo desviador; s la succión, p_s la relación del incremento aparente de la cohesión con la succión; M es la pendiente de la línea de estado crítico, y p_0 el esfuerzo de preconsolidación bajo condiciones isotropas a una succión determinada. El estado final de las muestras en los ensayos de compresión triaxial también se ha representado en el espacio volumen específico y esfuerzo medio neto ($v : p$). Esta línea de estado crítico que varía con la succión la define por la siguiente expresión (Wheeler & Sivakumar, 1995):

$$v = B(s) + \dots \ln \left(\frac{p}{p_{at}} \right) \quad (6.9)$$

Donde $\dots(s)$ es la pendiente y $B(s)$ el intercepto de la línea de estado crítico en función de la succión. Los valores de la pendiente $\dots(s)$ y del intercepto, $B(s)$ fueron:

$$\begin{aligned} \dots(s = 0.8) &= -0.18 & \dots(s = 0) &= -0.058 \\ B(s = 0.8) &= 0.66 & B(s = 0) &= 0.38 \end{aligned}$$

En la Fig. 6.92 se muestra la línea de estado crítico (CSL), así como la línea normalmente consolidada (NCL) para los ensayos, bajo una succión $s = 0.8$ MPa y en muestras saturadas ($s = 0$). Se observa que la pendiente de la línea de estado crítico y la normalmente consolidada de las muestras saturadas presentan un menor valor. Por otro lado, en los ensayos en muestras no saturadas, la línea NCL no es paralela a la línea CSL manifestando una mayor pendiente la CSL. En las muestras saturadas las dos líneas son casi paralelas.

6.3.5 Comentarios finales

La célula triaxial con control de succión es un equipo adecuado para investigar la respuesta hidromecánica de las muestras no saturadas en ensayos de compresión triaxial. En ella se pueden realizar diferentes trayectorias de esfuerzos antes de una etapa de corte, pudiendo analizar muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas, imponiendo el estado a la muestra por un proceso hidráulico y/o mecánico.

El sistema de doble drenaje reduce el tiempo de equilibrio de las presiones intersticiales; no obstante, presenta la desventaja de atrapar aire en el centro de la muestra haciendo difícil obtener grados de saturación más elevados a succiones bajas. Al final de cada ensayo se ha determinado la humedad de la muestra, de manera que ésta sea comparada con el valor obtenido mediante las lecturas de los medidores de volumen del cambio de agua intersticial (Tabla 6.18), los cuales, puede considerarse que el sistema de medida empleado fue apropiado para evaluar los cambios de humedad del suelo durante el ensayo. En la Fig. 6.93, se presenta un resumen de los resultados de compresión triaxial, donde se observa la estabilización de los desviadores y de los cambios de volumen. En la evolución del volumen con la deformación axial se observa un comportamiento contractante que cesa a partir de una deformación axial aproximadamente mayor de $\kappa_f > 7\%$ en muestras sobreconsolidadas y $\kappa_f > 13\%$ en la normalmente consolidadas. Los resultados se interpretaron dentro de un contexto de estado crítico (Alonso, *et al*, 1990). La tendencia al aumento de volumen de las muestras sobreconsolidadas es coherente con el citado modelo; sin embargo, el aumento de volumen medido al final de las fases de corte en las muestras normalmente consolidadas no parece encajar con las previsiones del citado modelo. En la Fig. 6.94a se aprecia en el plano $q : \kappa_f$ la curva esfuerzo–deformación medida en los ensayos hasta una deformación axial aproxima de $\kappa_f = 2.0\%$. Además la mayor rigidez de las muestras sobreconsolidadas por medio de un ciclo de humedecimiento–secado y de un ciclo de carga–descarga isotropa, una primera etapa con una evolución lineal hasta alcanzar la superficie de fluencia inicial, continuando con deformaciones plásticas.

Tabla 6.18 Valores del contenido de humedad al final del ensayo.

Ensayo	w(%) (secado al horno)	w(%) (sistema de buretas)
IS – NC – 06	9.97	10.48
IS – NC – 12	9.53	9.32
IS – OC – 03	9.79	9.86
IS – OC – 06	10.0	10.48
IWS – OC – 87	8.39	8.62
IWS – OC – 01	9.67	10.10
IWS – NC – 02	12.16	12.64

Durante la etapa de corte se observó en todas las muestras, la expulsión de agua hasta alcanzar un valor estable, excepto para el ensayo bajo una succión inferior ($s = 0.02$ MPa) donde en la fase inicial de rotura entró agua a la muestra y posteriormente una deformación axial mayor de 5 % comenzó a expulsar agua hasta alcanzar un valor estable. En la Fig. 6.94b se presentan las trayectorias asociadas con las variables e y e_w en los distintos ensayos de rotura midiendo cambios importantes en los grados de saturación en las trayectorias de los ensayos IS-OC-03, IWS-OC-87 y IWS-OC-01, asociadas con la dilatación de las muestras en las etapas finales de la rotura. Igualmente se aprecia que no existen cambios importantes en el contenido de agua durante el comportamiento dilatante. Algunos autores (Rampino, *et al*, 2000) han detectado cierta entrada de agua durante esta etapa. En las Figs. 6.95, 6.96 y 6.97 se dibujaron la influencia de la succión (s), grado de saturación (S_r) y esfuerzo radial neto ($\omega_b - u_a$) sobre el módulo de Young (E), para muestras normalmente consolidadas y sobre consolidadas, y en la Fig. 6.95 el incremento de la succión que induce un incremento en el módulo E , el cual disminuye con el aumento del grado de saturación (Fig. 6.96).

Sin embargo, el efecto de la succión es más importante que el del grado de saturación, ya que muestras con distintos grados de saturación y a la misma succión presentan valores del módulo elástico muy similares, y también se ve afectado por el esfuerzo radial neto, a mayor esfuerzo mayor módulo de E (Fig. 6.97). Este comportamiento influido por la s , S_r y $\omega_b - u_a$, también fue reportado por Rampino, *et al* (2000). En la Tabla 6.19 se resumen los valores de los parámetros del suelo en cada ensayo.

Tabla 6.19 Parámetros del suelo. Ensayo de compresión triaxiales en muestras no saturadas.

Ensayo	$\omega_b - u_a$ MPa	$u_a - u_w$ MPa	E MPa	G MPa	τ Poisson#	$\rho\#$	$\zeta\#(s)\#$
IS – NC – 06	0.6	0.8	389	135	0.33	0.006	0.078
IS – NC – 12	1.2	0.8	548	213	0.32	0.003–0.007	0.064
IS – OC – 03	0.3	0.8	231	64	0.26	0.007	0.085
IS – OC – 06	0.6	0.8	407	153	0.34	0.0055	0.091
IWS – OC – 87	0.6	0.8	428	155	0.36	0.0063	0.060
IWS – OC – 01	0.6	0.8	398	130	0.45	0.0043	0.085
IWS – NC – 02	0.6	0.02	226	119	0.27	0.0054	0.085

6.4 Interpretación de los ensayos de compresión triaxial mediante el modelo elastoplástico BBM

6.4.1 Introducción

Hasta el momento se han presentado las superficies de fluencia del modelo de Barcelona utilizando unos parámetros obtenidos a partir del ajuste de los ensayos de compresión isotrópica en condiciones saturadas, y tratando de reproducir las condiciones en las que se pasaba del régimen elástico al elastoplástico. Como se ha visto en las secciones anteriores, con esos parámetros se pueden obtener puntos de la superficie de fluencia en el plano $p : q$ que se asemejan mucho a los medidos. Sin embargo, con el empleo simultáneo de toda la información derivada de todos los ensayos (incluyendo los ensayos de compresión triaxial), se conduce a un conjunto de parámetros más global que permitirá explicar mejor los resultados obtenidos. A continuación se indica la forma en que se ha logrado cada parámetro del modelo de Barcelona, y en la Tabla 6.20 el valor finalmente adoptado para los mismos. El procedimiento para la obtención de los parámetros se indica a continuación:

- ∉ $\zeta(0)$, η y r : coeficiente de compresibilidad y parámetros que controlan la compresibilidad del suelo. Para determinarlas se tomaron en cuenta los resultados de los ensayos de compresión isotrópica en muestras saturadas (Tabla 4.16, Fig. 4.36) y de los ensayos triaxiales en muestras saturadas CD-103 y CD-104 (Tabla 4.21, Figs. 4.54 y 4.55). Se seleccionó un conjunto de parámetros que ha permitido el mejor ajuste en la simulación.
- ∉ ρ : es el coeficiente de compresibilidad en el rango elástico. Se determina a partir de la curva saturada de descarga–recarga de los ensayos a compresión isotrópica (Tabla 4.16, Fig. 4.36) y de los ensayos triaxiales saturados CD-103 y CD-104 (Tabla 4.21, Fig. 4.54 y 4.55). El valor de ρ se ajustó a un valor que permitiera reproducir con la máxima precisión los ensayos. Alguna dependencia de ρ sobre s es también probable (Alonso, 1993), pero se ha utilizado un valor constante para asegurar que la parte elástica de modelo sea conservadora.
- ∉ p^c : es un esfuerzo de referencia. Es el esfuerzo medio neto por el que se alcanza el estado saturado virgen partiendo de un estado no saturado, igualmente virgen, en una trayectoria de reducción de la succión que solamente genera expansiones elásticas. La elección del valor más apropiado de p^c fue el que mejor ajuste dio en la simulación para reproducir los resultados experimentales.
- ∉ ζ_s : parámetros de rigidez con respecto a los cambios en succión para el estado virgen del suelo. Este parámetro se obtuvo del ensayo de compresión triaxial (IWS–OC–87) en la trayectoria de aumento de la succión de $\Phi_0 = 0.8 \text{ MPa} \downarrow \Phi_0 - 87 \text{ MPa}$ (Fig. 6.101).
- ∉ ρ_s : parámetro de rigidez elástica para cambios en succión. Se ha obtenido de las trayectorias de secado tras una disminución previa de la succión, en ambos casos a esfuerzo medio neto constante. Los valores de los parámetros se dedujeron de los ensayos isotrópicos ISO-1, ISO-2 (Tabla 6.9, Fig. 6.46, 6.47), TISO-1 (Tabla 6.15, Fig. 6.54) y del ensayo de compresión triaxial IWS-OC-01 (Fig. D.27 del Anexo D).
- ∉ G , τ , E , K : se defibieron de las curvas $q : \kappa_s$ y $q : \kappa_f$ en la etapa de descarga–recarga de los ensayos de compresión triaxial, tomando la pendiente correspondiente a la recta tangente de dichas curvas. Se ha observado que el módulo E tiene cierta dependencia de la succión ($u_a - u_w$), grado de saturación (S_r) y del esfuerzo radial neto ($\omega_B - u_a$) (Tabla 6.19, Fig. 6.95–6.97).
- ∉ M : pendiente de la línea de estado crítico. Este parámetro ha sido resultado de los ensayos triaxiales en muestras saturadas (Fig. 4.53) y de los triaxiales en muestras no saturadas siguiendo

una trayectoria $\iota q/\iota p = 3$ a succión constante y el valor máximo alcanzado en el espacio $p : \kappa$ (Fig. 6.90 y 6.93).

∄ ζ : parámetro de la regla de flujo. Obtenido del cálculo de M , ρ y $\zeta(0)$. Su elección es tal que la regla flujo prediga cero deformaciones laterales para un estado de esfuerzos correspondientes a una condición de K_0 (Alonso, *et al*, 1990).

∄ k_s : parámetro que relaciona la cohesión con la succión. Deducido de los ensayos de compresión triaxial IS-OC-03, IS-NC-06 y IS-NC-12 (Fig. 6.90).

Tabla 6.20 Parámetros del material usados en la simulación con el modelo BBM.

Símbolo	Parámetro	Valor
$\zeta(0)\#$	Coficiente de compresibilidad elastoplástico en condiciones saturadas con respecto a p	0.073
$\zeta(s)$	Coficiente de compresibilidad elastoplástico en condiciones no saturadas con respecto a p	0.060
$\rho\#$	coeficiente de compresibilidad elástico con respecto a p	0.005
$p^c\#$	Esfuerzo de referencia	0.07 kPa
r	Parámetro que controla la compresibilidad del suelo	0.782
$\eta\#$	Parámetro que controla la compresibilidad del suelo	155 MPa ⁻¹
$\zeta_s\#$	Parámetro de rigidez con respecto a los cambios en succión para el estado virgen del suelo	0.005
$\rho_s\#$	Parámetro de rigidez elástica para cambios en succión	0.001
$\tau\#$	Módulo de Poisson	0.33
$I \#$	Pendiente de la línea de estado crítico	1.155
$\zeta\#$	Parámetro de la regla de flujo	0.60
k_s	Parámetro que relaciona cohesión con la succión	0.42

4 p_0^* : esfuerzo de preconsolidación para la condición saturada. Este valor fue obtenido de los ensayos de compresión isotrópica en condiciones saturadas (Tabla 4.16, 4.21; Fig. 4.36, 4.54 y 4.55).

Puede observarse que la diferencia con los valores de los parámetros utilizados anteriormente no es muy significativa. Sin embargo, con estos nuevos parámetros se logra un mejor ajuste en las deformaciones. En la Fig. 6.98 se muestra la forma de la superficie de fluencia inicial para un esfuerzo de compactación isotrópico de 0.6 MPa y una succión de 0.8 MPa, que se obtiene con cada uno de los tres conjuntos de parámetros utilizados en la investigación. Se observa que la forma de la superficie de fluencia es muy similar cuando se usan los parámetros para el análisis de los ensayos isotrópicos, triaxiales y con la simulación con el BBM. No obstante, la forma adoptada para dicha superficie recurrieron a los parámetros a partir de los ensayos edométricos es diferente, indicando mayor deformación de colapso cuando se disminuye la succión.

6.4.2 Reproducción de los resultados experimentales

Se comparan algunos resultados experimentales obtenidos de los ensayos de compresión triaxial (muestras normalmente consolidadas y sobreconsolidadas) con los resultados numéricos del modelo BBM mediante los parámetros de la Tabla 6.20. En el subcapítulo 6.3, se presenta el análisis de los resultados, así como la forma y la posición adoptada de la superficie de fluencia (LC) durante los diferentes procesos previos al corte con los parámetros de la Tabla 6.12, y en la Tabla 6.21 los ensayos utilizados para reproducir su comportamiento por medio del modelo, así como las condiciones iniciales de las muestras.

La Fig. 6.99 muestra la comparación en términos de κ y p , entre la simulación con el modelo y los resultados experimentales de la trayectoria de *carga–descarga* isótropa a succión constante del ensayo IS-OC-06 (A↓ B↓ C), como se muestra en la trayectoria de la Fig. 5.15. Se comprueba que la predicción realizada se ajusta muy bien a las medidas.

Tabla 6.21 Ensayos de laboratorio y sus condiciones iniciales.

Ensayo	Trayectoria tensional	Condiciones iniciales	
IS – NC – 06	Fig. 5.12	$w_0 = 11.0 \pm 0.2 \%$,	$s_0 = 0.8 \text{ MPa}$
IS – OC – 06	Fig. 5.15	$(\omega_m - u_a)_0 = 0.6 \text{ MPa}$,	$e_0 = 0.63$
IWS – OC – 01	Fig. 5.16	$v_s = 26.6 \text{ kN/m}^3$,	$Sr_0 = 48 \%$
IWS – OC – 87	Fig. 5.19	$\rho_{d0} = 1.67 \text{ g/cm}^3$	

En la Fig. 6.100 se presenta la curva experimental $\kappa : s$ correspondiente al ensayo de compresión triaxial IWS-OC-01 de la trayectoria de *humedecimiento–secado* (B↓ C↓ D) bajo esfuerzo medio neto constante, comparada con la curva obtenida por el modelo. Se observa que la predicción se ajusta adecuadamente a los resultados experimentales.

En el ensayo IWS–OC–87 se ha medido una expansión elástica tras la aplicación de la elevada succión, que presentó valores muy grandes en la dirección radial. Dado que en el resto de los ensayos se ha observado un comportamiento deformacional isótropo, se ha optado por definir la deformación volumétrica sólo a partir de la deformación axial. Con estas hipótesis se concluye que el modelo reproduce razonablemente el comportamiento volumétrico (Fig. 6.101), así como el comportamiento en la trayectoria de corte (Fig. 6.102).

En la Tabla 6.21 se indican las figuras que muestran las trayectorias de esfuerzos en los cuatro ensayos de la Fig. 6.102, donde se muestra la comparación de la predicción del modelo y los resultados experimentales de la *trayectoria de corte* en términos de q y κ . Se encuentra que para la muestra normalmente consolidada (IS–NC–06), el modelo reproduce adecuadamente una deformación gradual de las deformaciones plásticas desde el comienzo de la etapa de rotura. Las muestras sobreconsolidadas, que muestran mayor rigidez inicialmente y después continúan con deformaciones de endurecimiento, también son adecuadamente simuladas.

En la Fig. 6.103 alude a las curvas de los resultados experimentales en el plano $\kappa : \kappa$ comparadas con las curvas predichas con el modelo. Se han comparado las deformaciones volumétricas locales (κ_c) y

globales (κ_i) durante la etapa de corte, habiéndose encontrado una concordancia satisfactoria desde el punto de vista cualitativo. La predicción del comportamiento normalmente consolidado del ensayo IS-NC-06 presenta una notable respuesta contractante, la cual es menos importante para las muestras sobreconsolidadas. No obstante, el modelo no puede ajustar las medidas del comportamiento dilatante al concluir la etapa de rotura.

Finalmente en la Fig. 6.104 se presentan los cuatro ejemplos correspondientes a los ensayos mencionados en la Tabla 6.21, en términos de $\kappa_i : \kappa_j$ comparados con las curvas obtenidas por el modelo. Se ha reproducido satisfactoriamente la deformación de corte (κ_j) con respecto a la deformación axial (κ_i).

6.4.3 Comentarios finales

En general, la predicción de los resultados experimentales con el modelo (BBM) fue bastante precisa, empleando un conjunto único de parámetros (Tabla 6.20) que se obtuvo del programa experimental.

La comparación en las trayectorias de corte muestra una buena capacidad del modelo, de reproducir el comportamiento de los resultados experimentales. En el caso de la muestra normalmente consolidada el modelo reproduce adecuadamente de forma gradual las deformaciones plásticas, al comienzo de la etapa de rotura. La respuesta rígida antes de alcanzar la superficie de fluencia en las muestras sobreconsolidadas, también se reproduce satisfactoriamente. Sin embargo, el punto de fluencia de la curva predicha por el modelo en el espacio $q : \kappa_j$ se presenta repentinamente, por lo que en un futuro sería necesario proporcionar una transición más gradual.

Por otro lado, se puede decir que para estos ensayos dentro del comportamiento volumétrico en términos de $\kappa_i : s$ y $\kappa_i : \kappa_j$, y desde un punto de vista cualitativo las predicciones pueden considerarse correctas. Sin embargo, el modelo no puede ajustar las medidas del comportamiento dilatante al final de la etapa de rotura. Por otro lado en el comportamiento volumétrico, en el plano $\kappa_i : p$ se aprecia buena concordancia tanto de forma cualitativa como cuantitativa. Igualmente, se evidencia un adecuado acoplamiento entre las superficies LC y SI. Esta última se activo a lo largo de la etapa de secado del ensayo IWS-OC-87.#

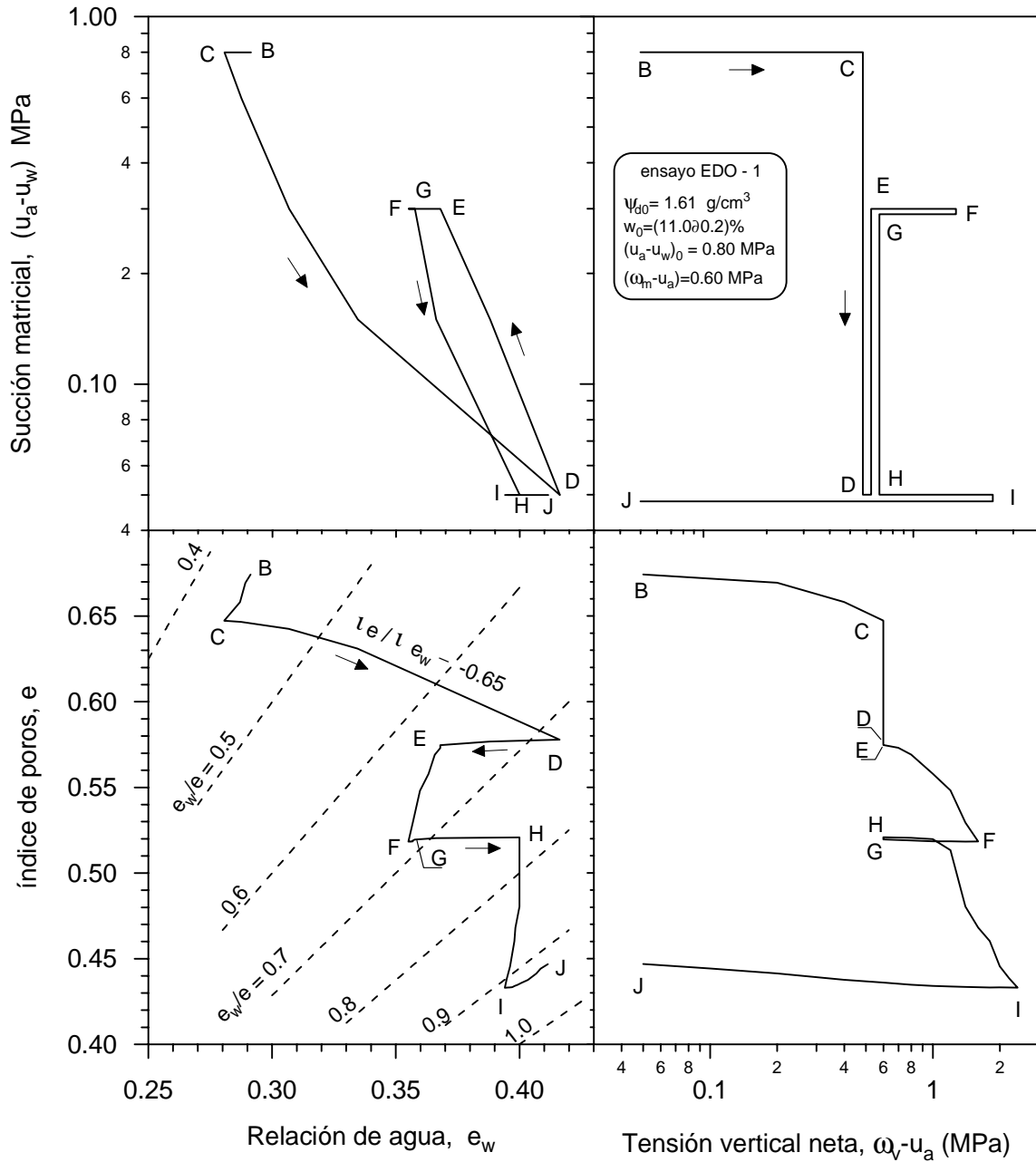


Figura 6.1 Trayectorias de esfuerzos de humedecimiento–secado, y carga–descarga realizados en el ensayo EDO-1. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables tensionales y volumétricas conjugadas).

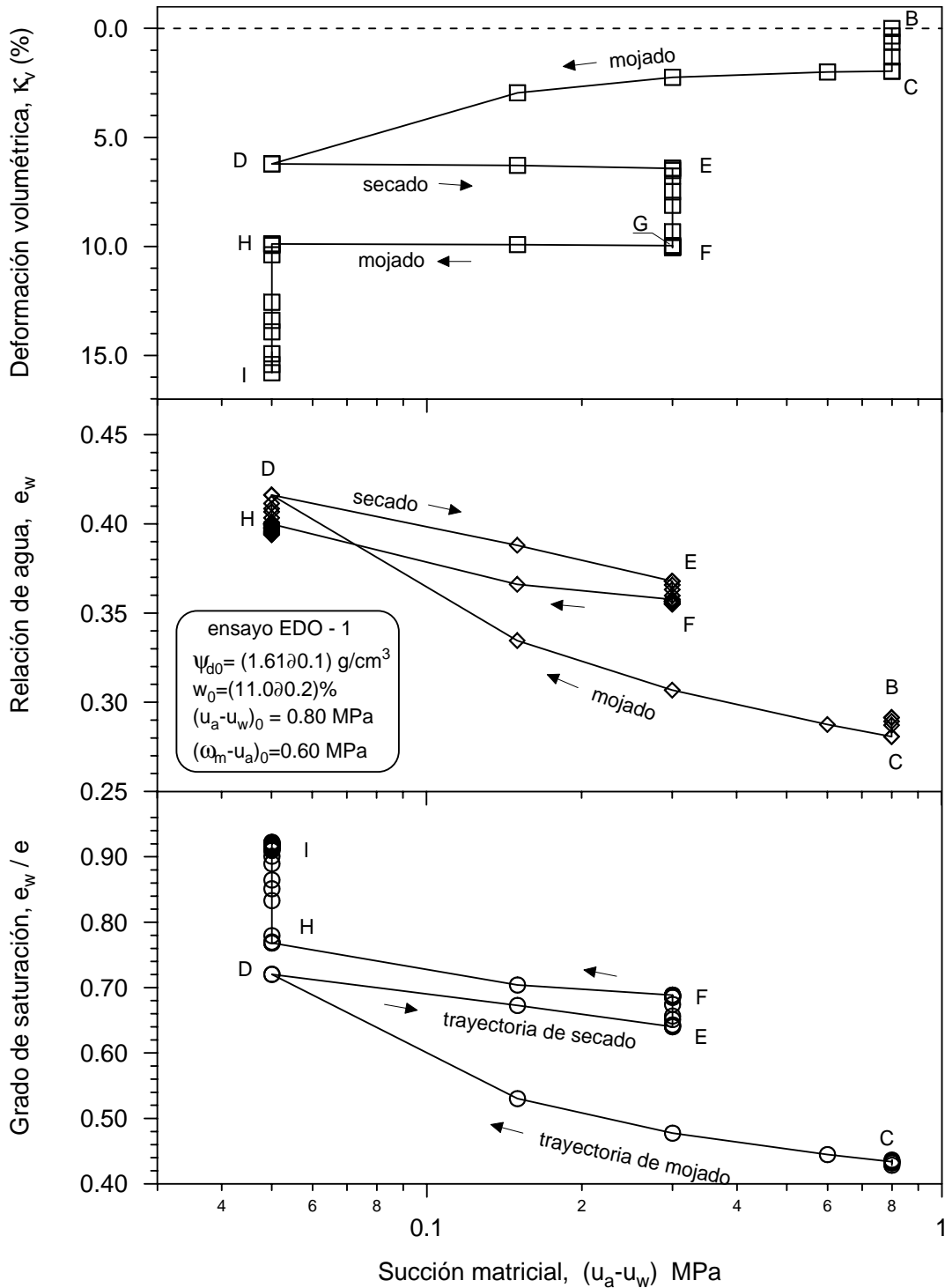


Figura 6.2 Variación de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de las diferentes etapas de equilibrio en relación con los cambios de succión, para el ensayo EDO-1.

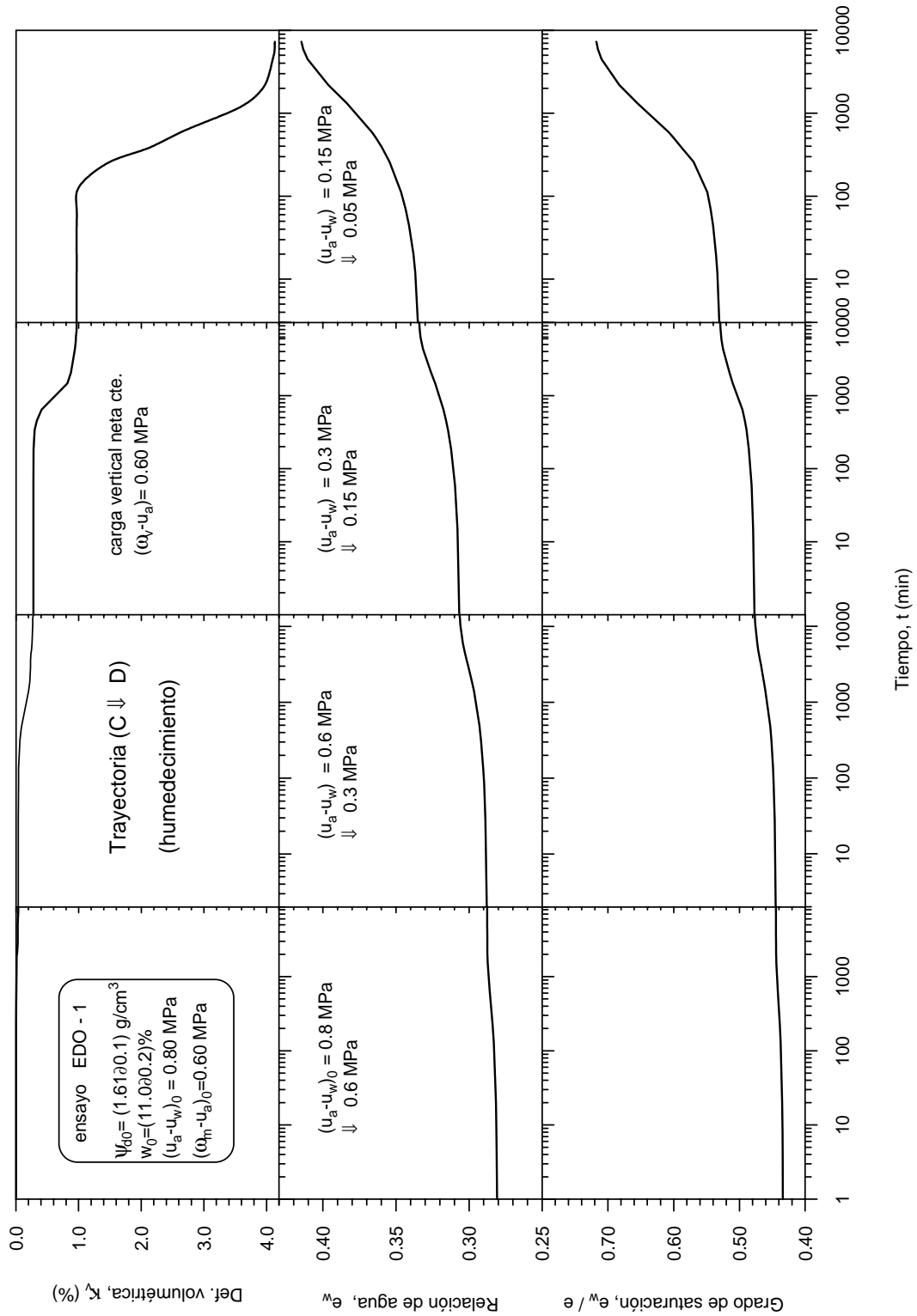


Figura 6.3 Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C \Downarrow D), bajo carga vertical constante $(\omega_v - u_a) = 0.6 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-1.

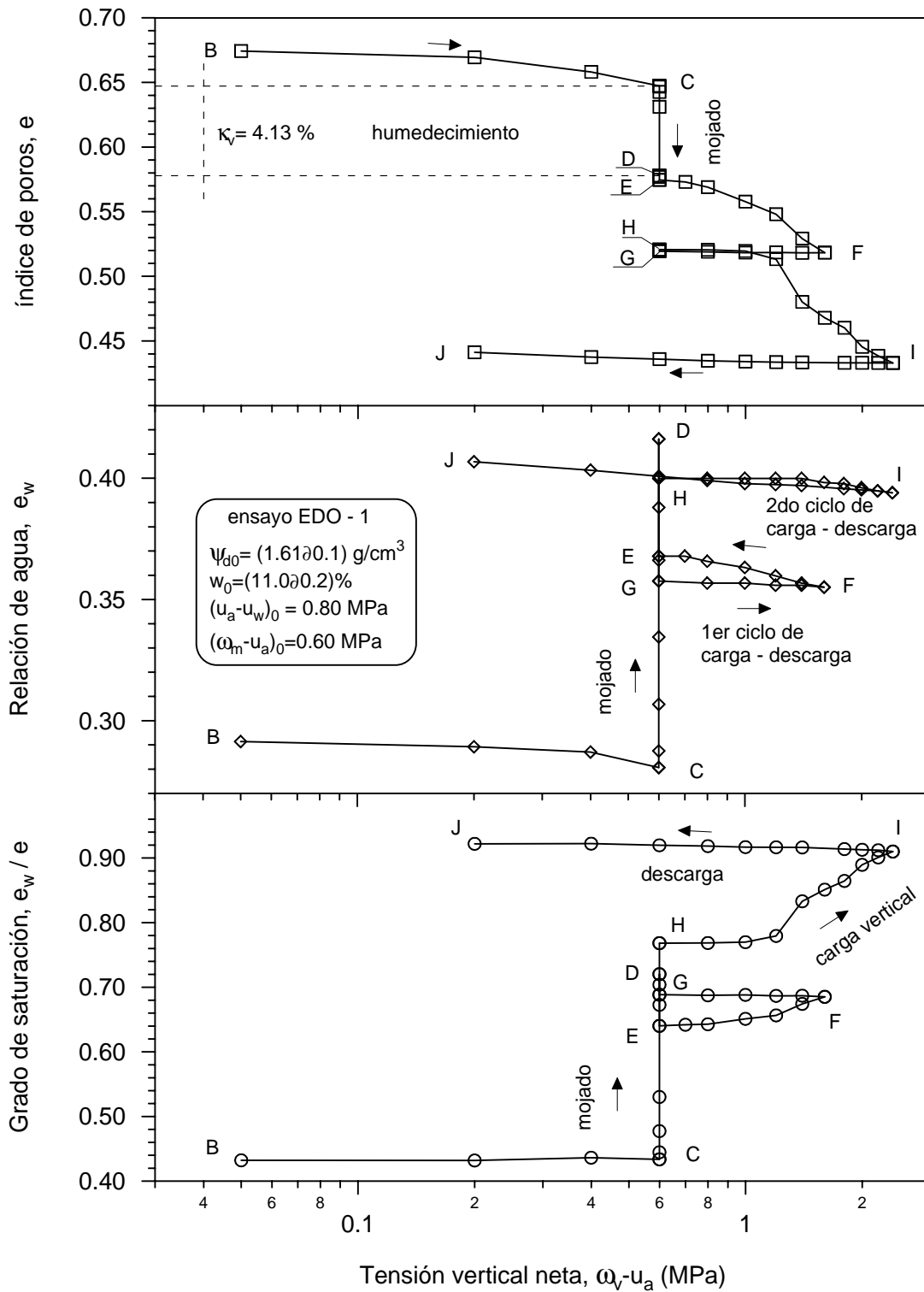


Figura 6.4 Variación del índice de poros, relación de agua, y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de esfuerzo, de humedecimiento-secado, y carga-descarga del Ensayo EDO-1.

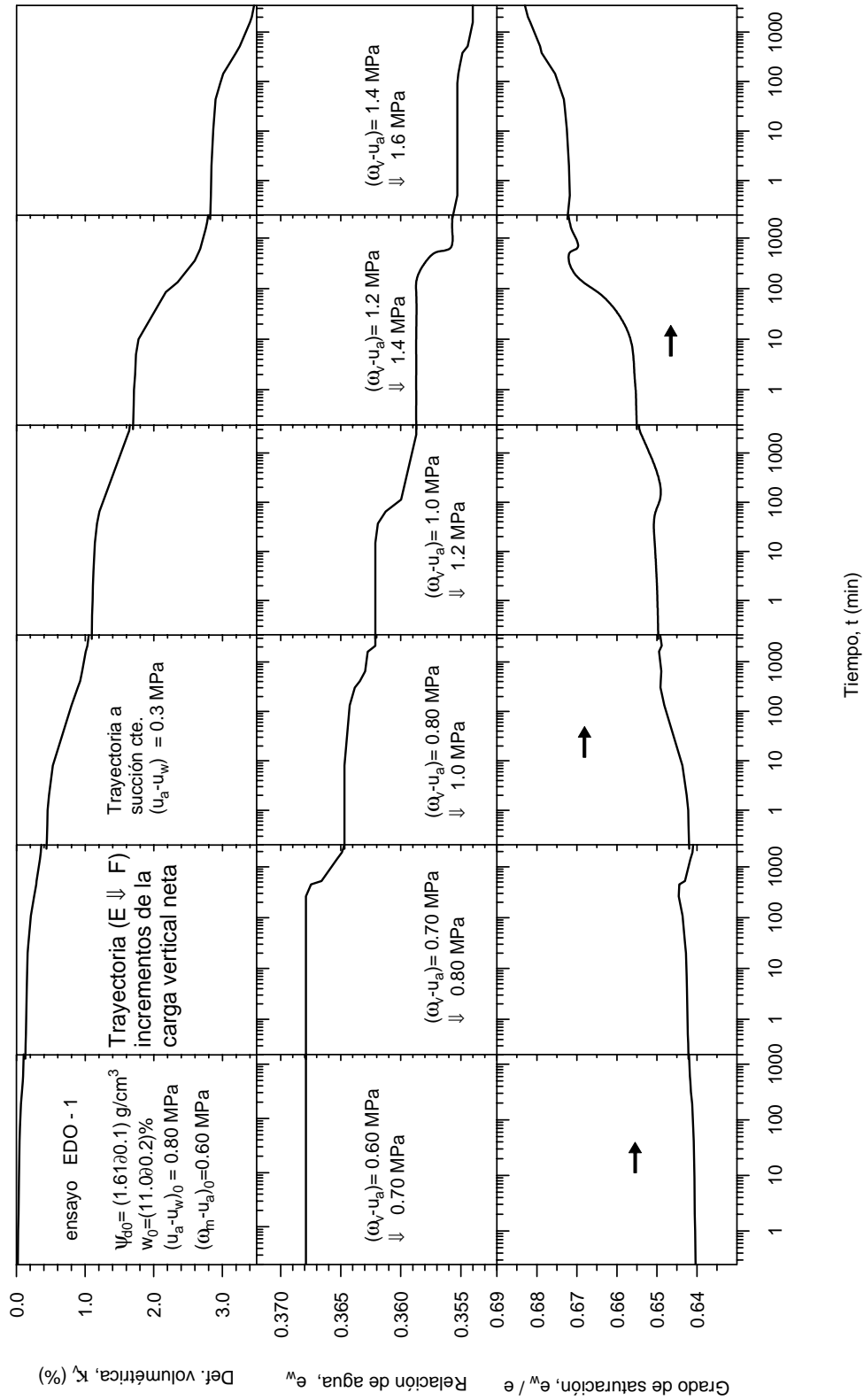


Figura 6.5 Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de la trayectoria de carga ($E \downarrow F$), bajo succión matricial constante $(u_a - u_w) = 0.3$ MPa. Ensayo EDO-1.

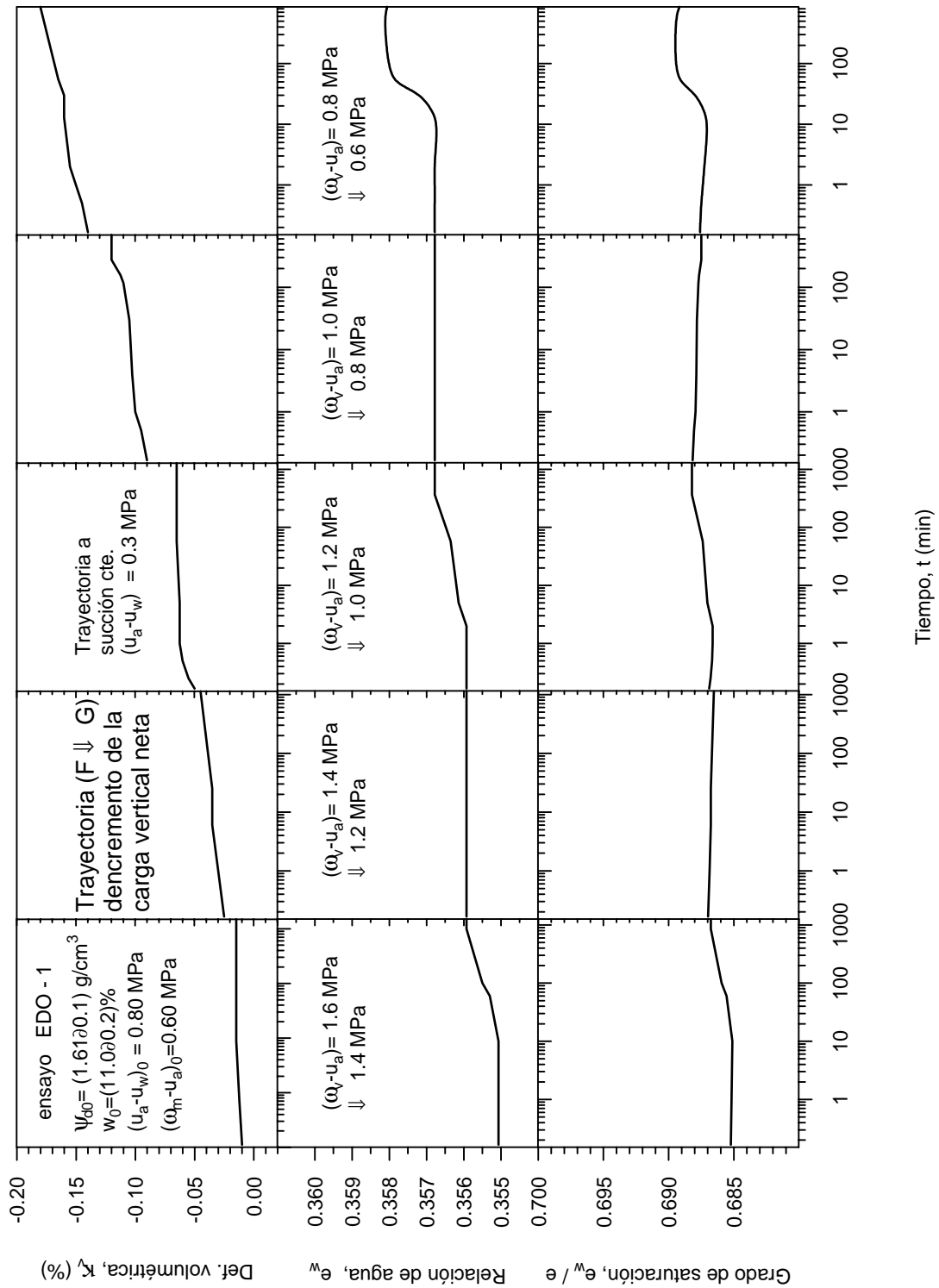


Figura 6.6 Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación de la trayectoria de descarga (F \Downarrow G), bajo succión matricial constante $(u_a - u_w) = 0.3 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-1.

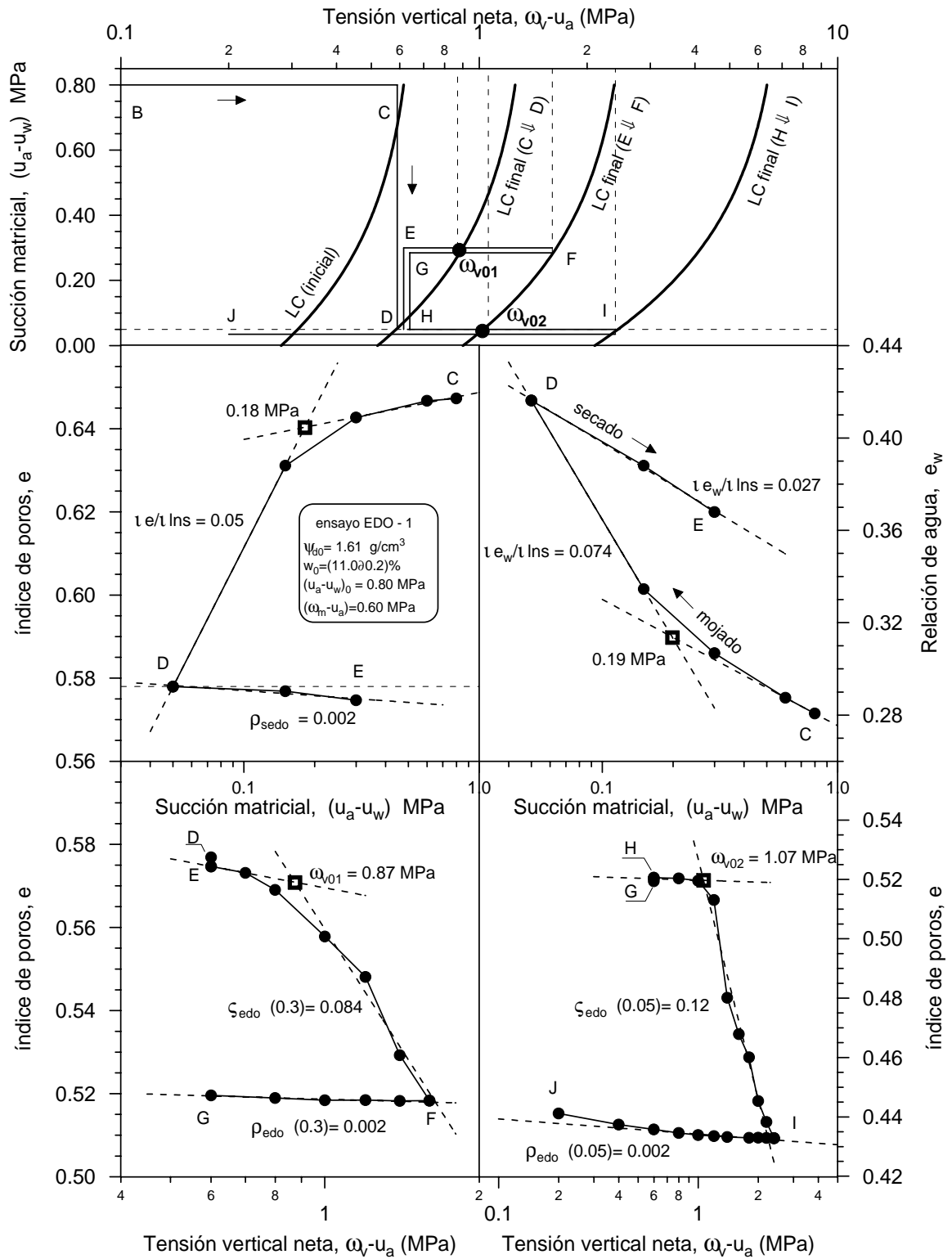


Figura 6.7 Representación gráfica de la obtención de los parámetros, en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga – descarga, y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_v - u_a)$, ensayo EDO-1.

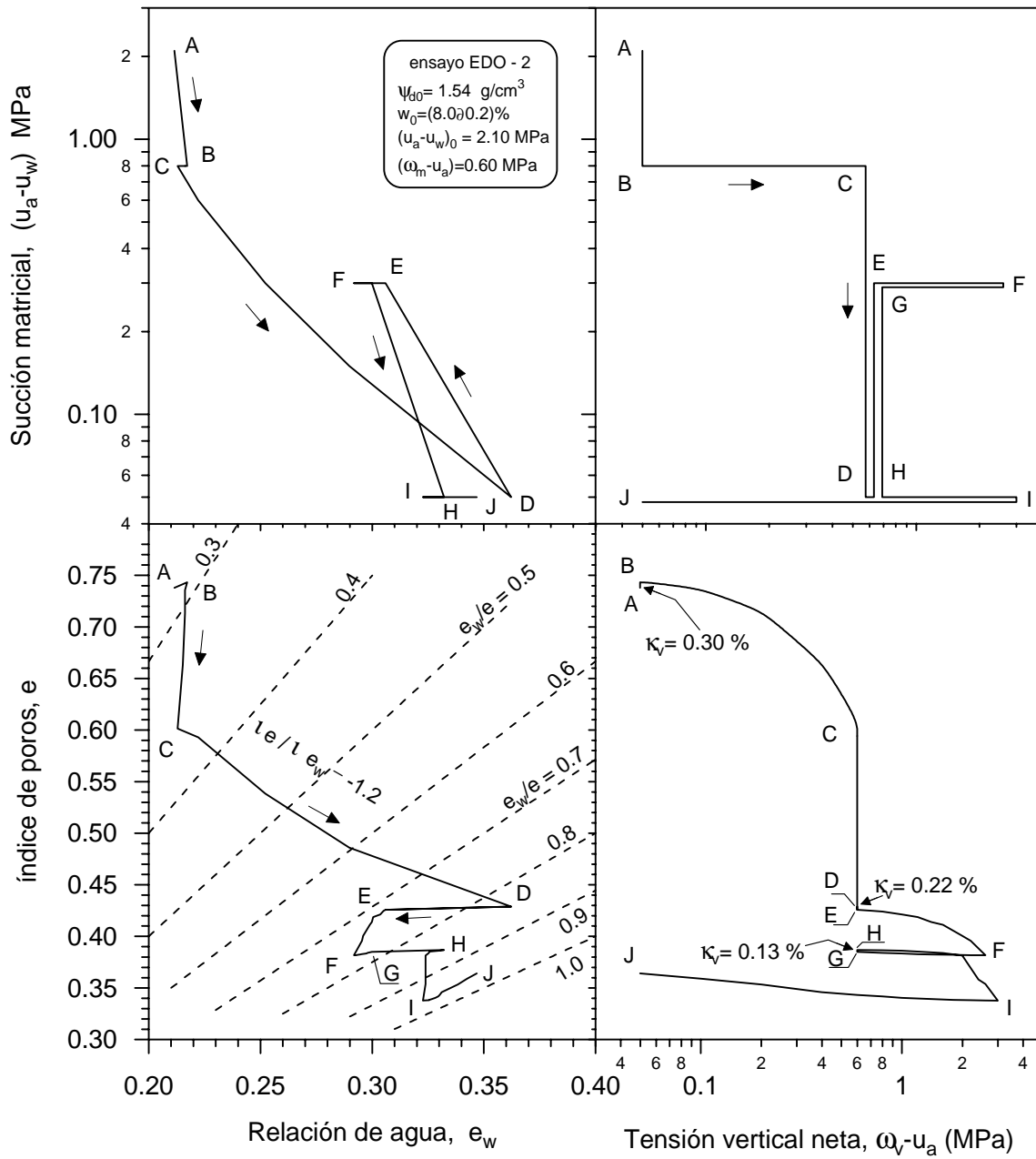


Figura 6.8 Trayectorias de esfuerzos de humedecimiento – secado, y carga – descarga realizados en el ensayo EDO-2. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables de esfuerzos y volumétricas conjugadas).

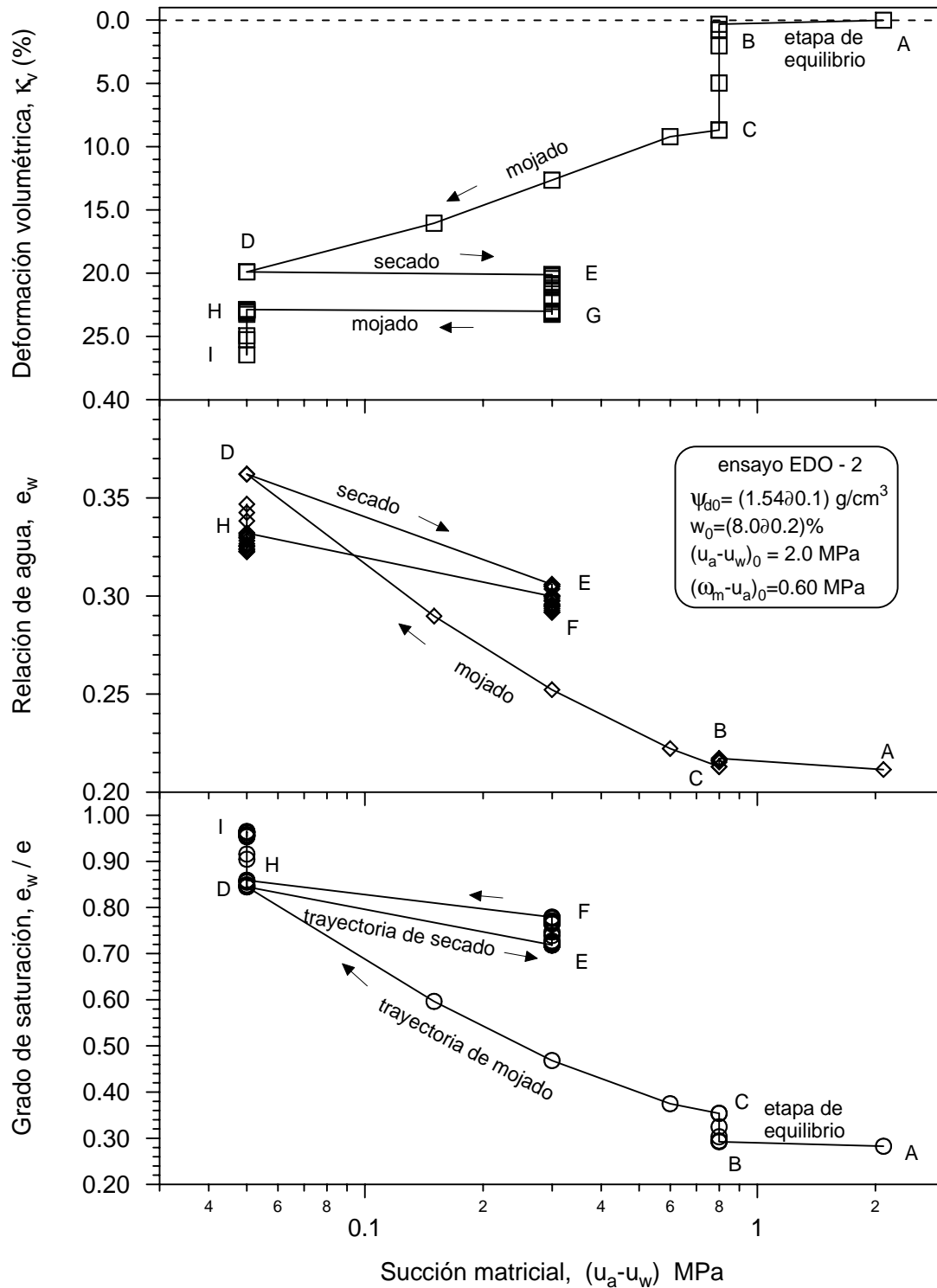


Figura 6.9 Variación de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación en las diferentes etapas de equilibrio en relación con cambios de succión, ensayo EDO-2.

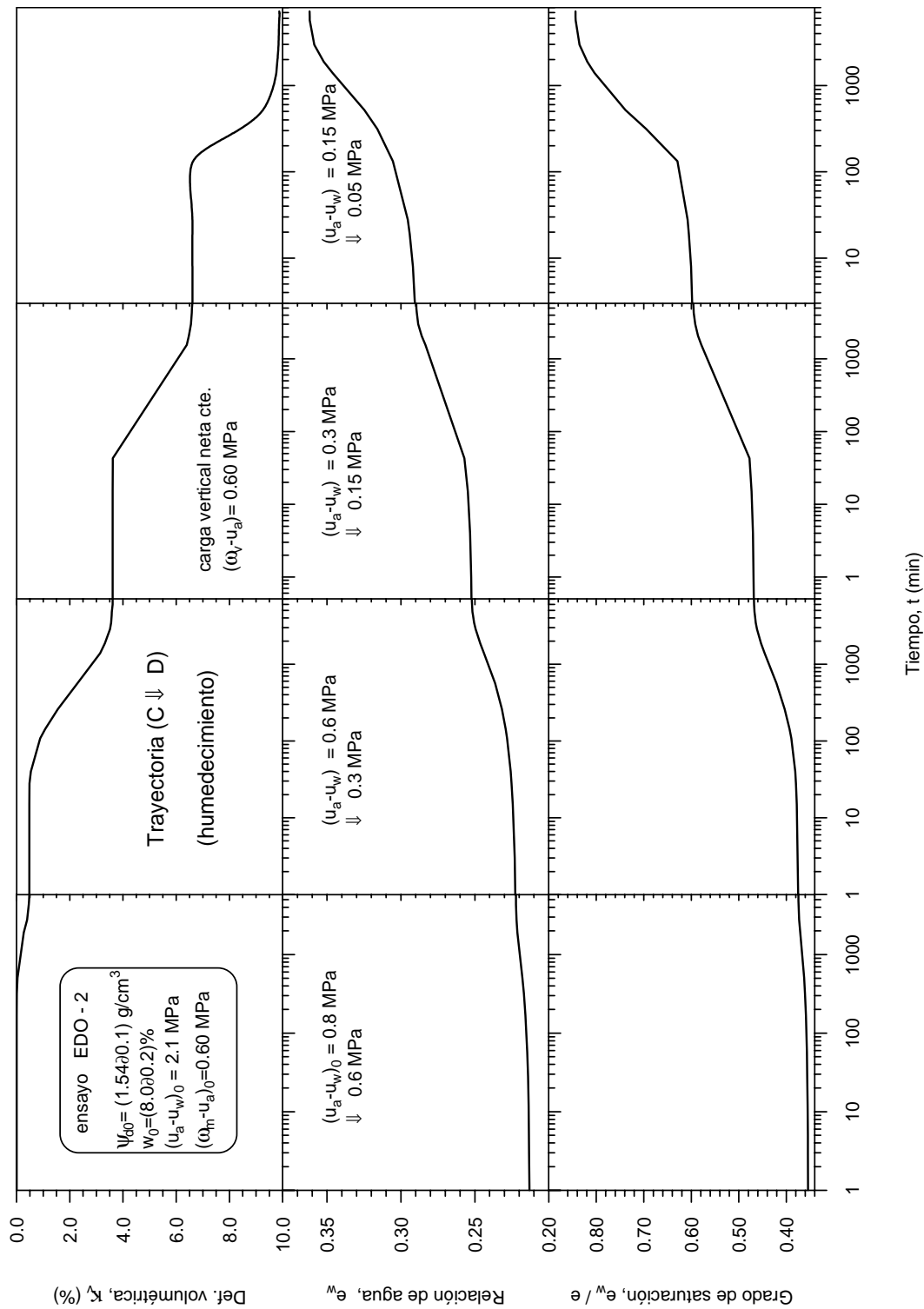


Figura 6.10 Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C \downarrow D), bajo carga vertical constante $(\omega_v - u_a) = 0.6$ MPa. Ensayo EDO-2.

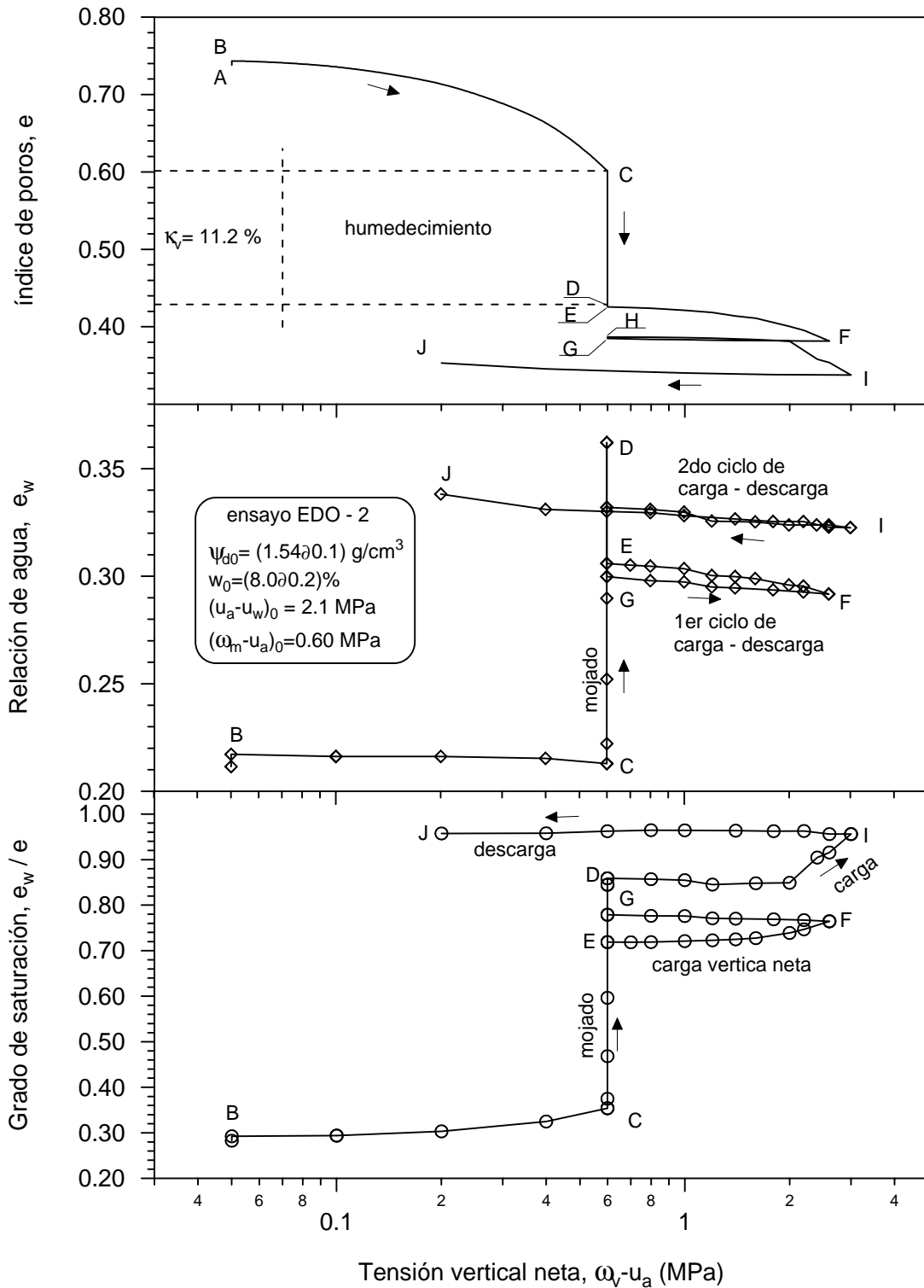


Figura 6.11 Variación del índice de poros, relación de agua, y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de esfuerzo de humedecimiento–secado, y carga–descarga del ensayo EDO-2.

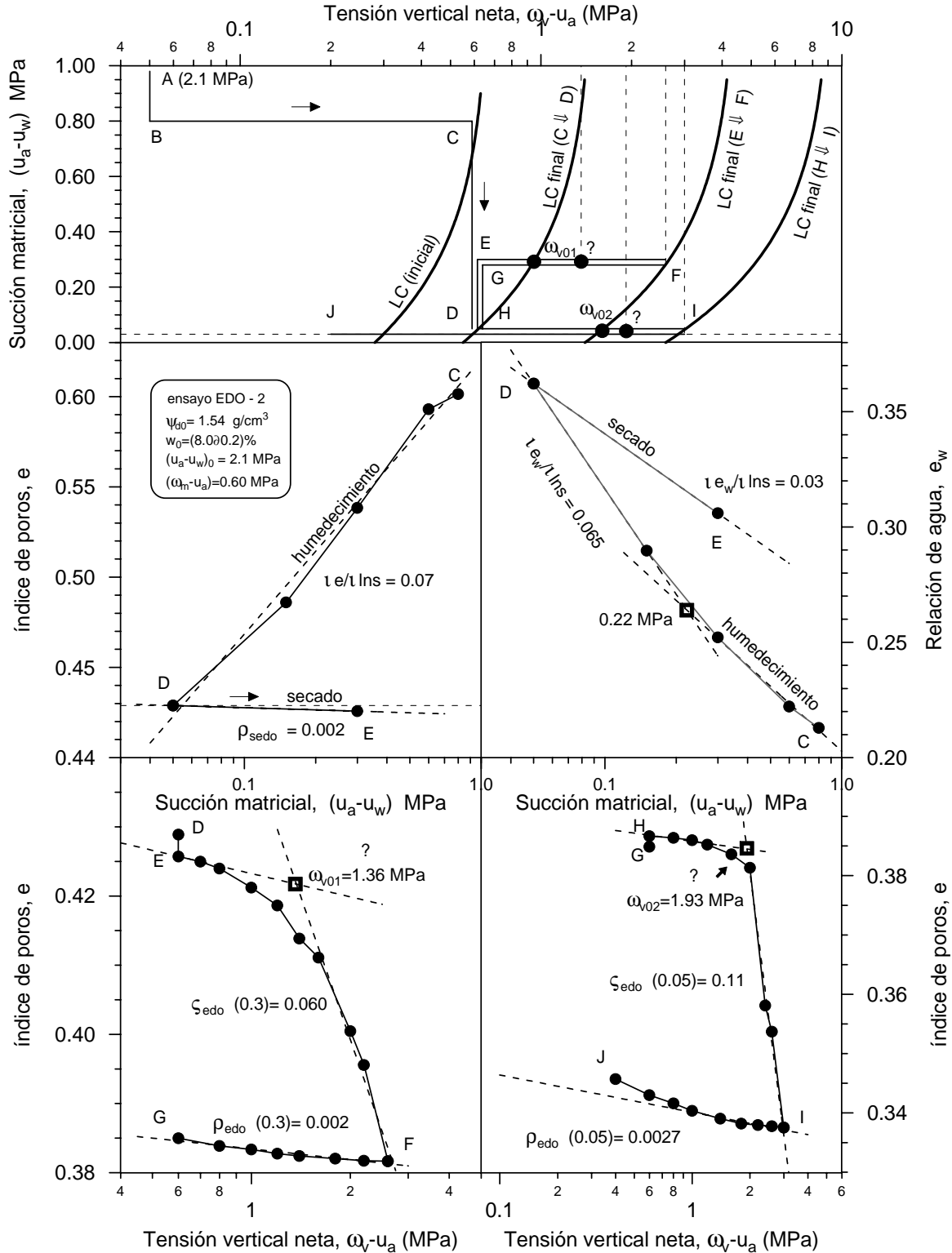


Figura 6.12 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_v - u_a)$, ensayo EDO-2.

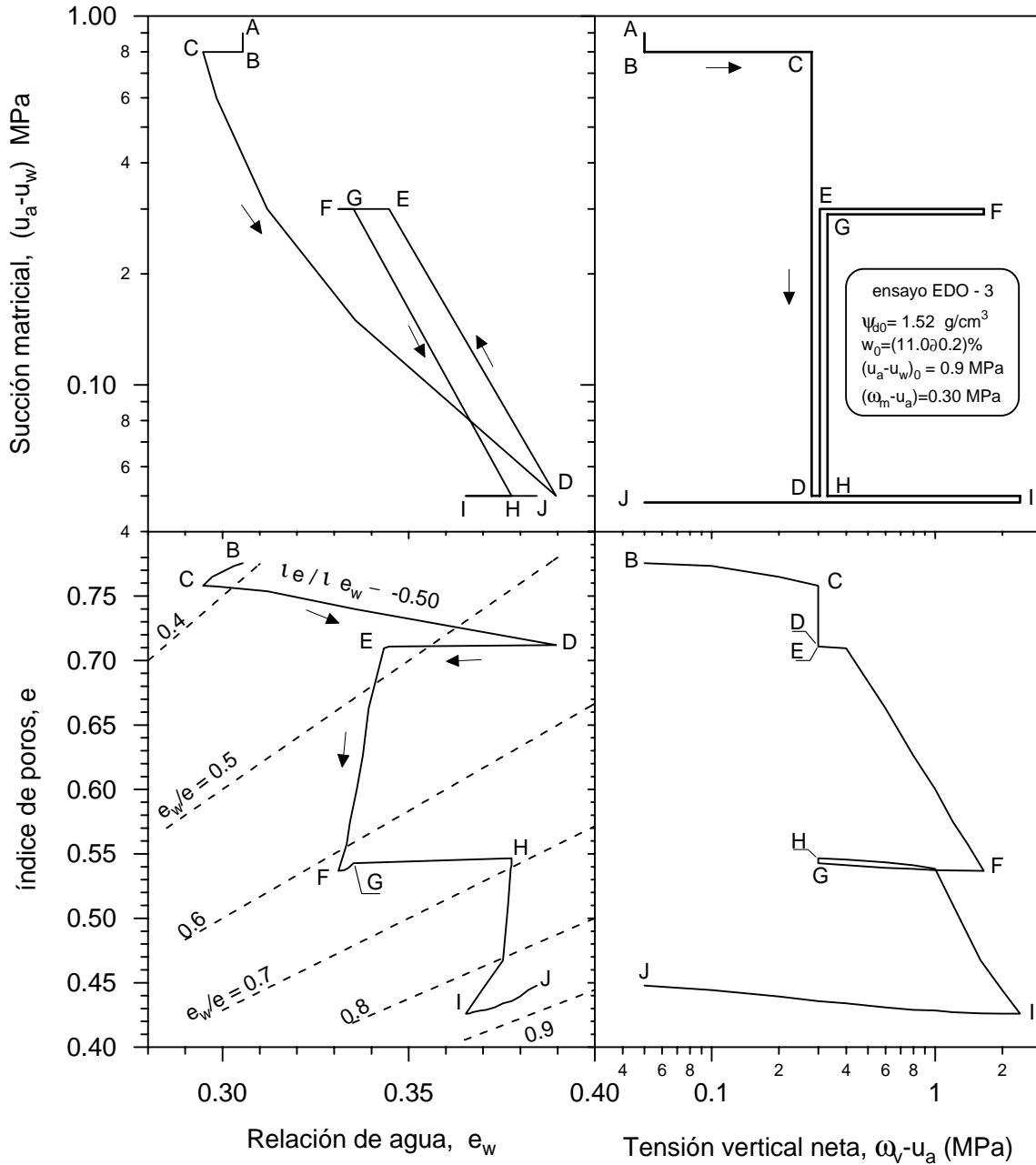


Figura 6.13 Trayectorias de esfuerzos de humedecimiento–secado, y carga–descarga realizados en el ensayo EDO-3. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables de esfuerzos y volumétricas conjugadas).

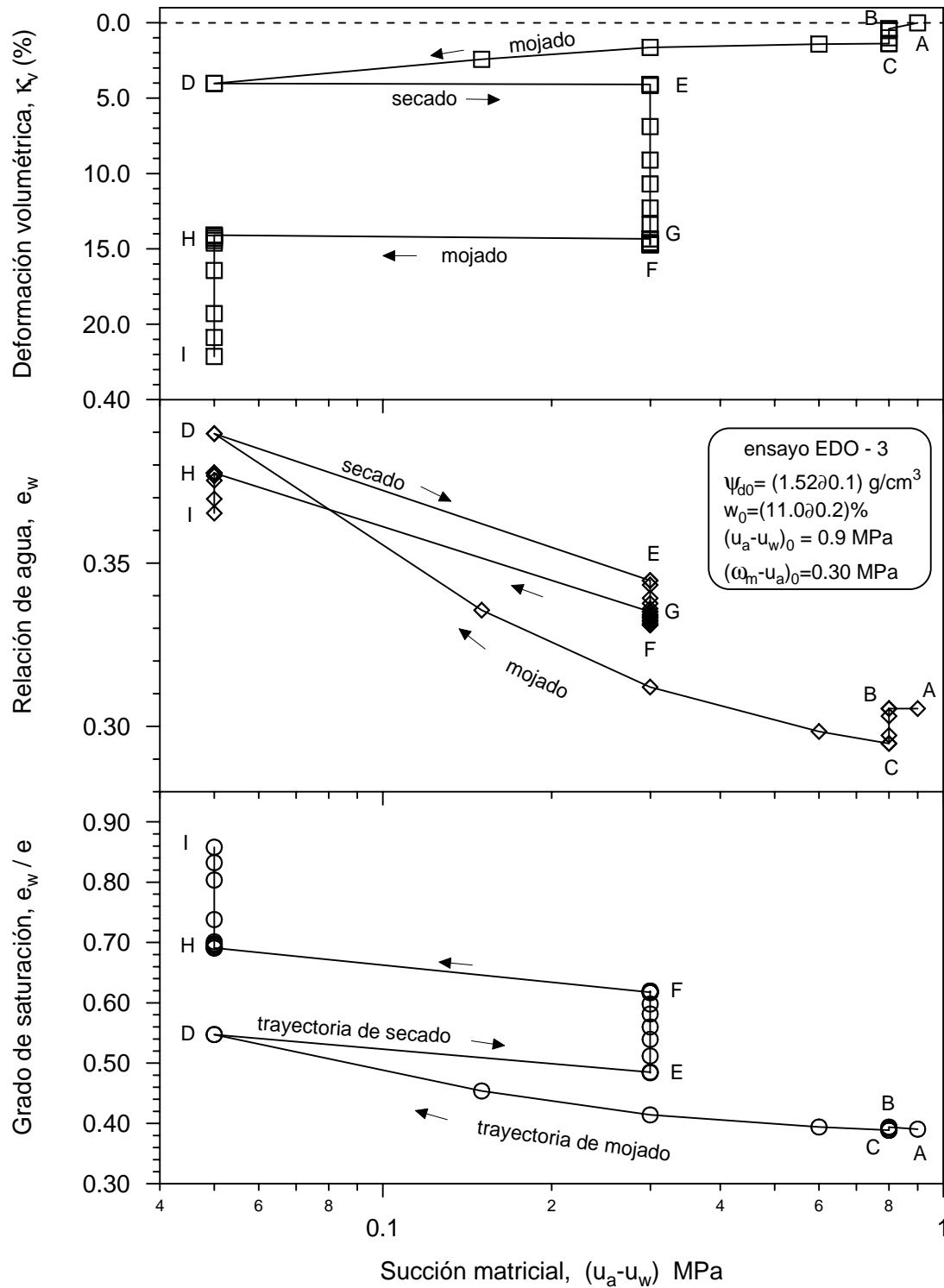


Figura 6.14 Variación de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación en las diferentes etapas de equilibrio en relación con los cambios de succión, ensayo EDO-3.

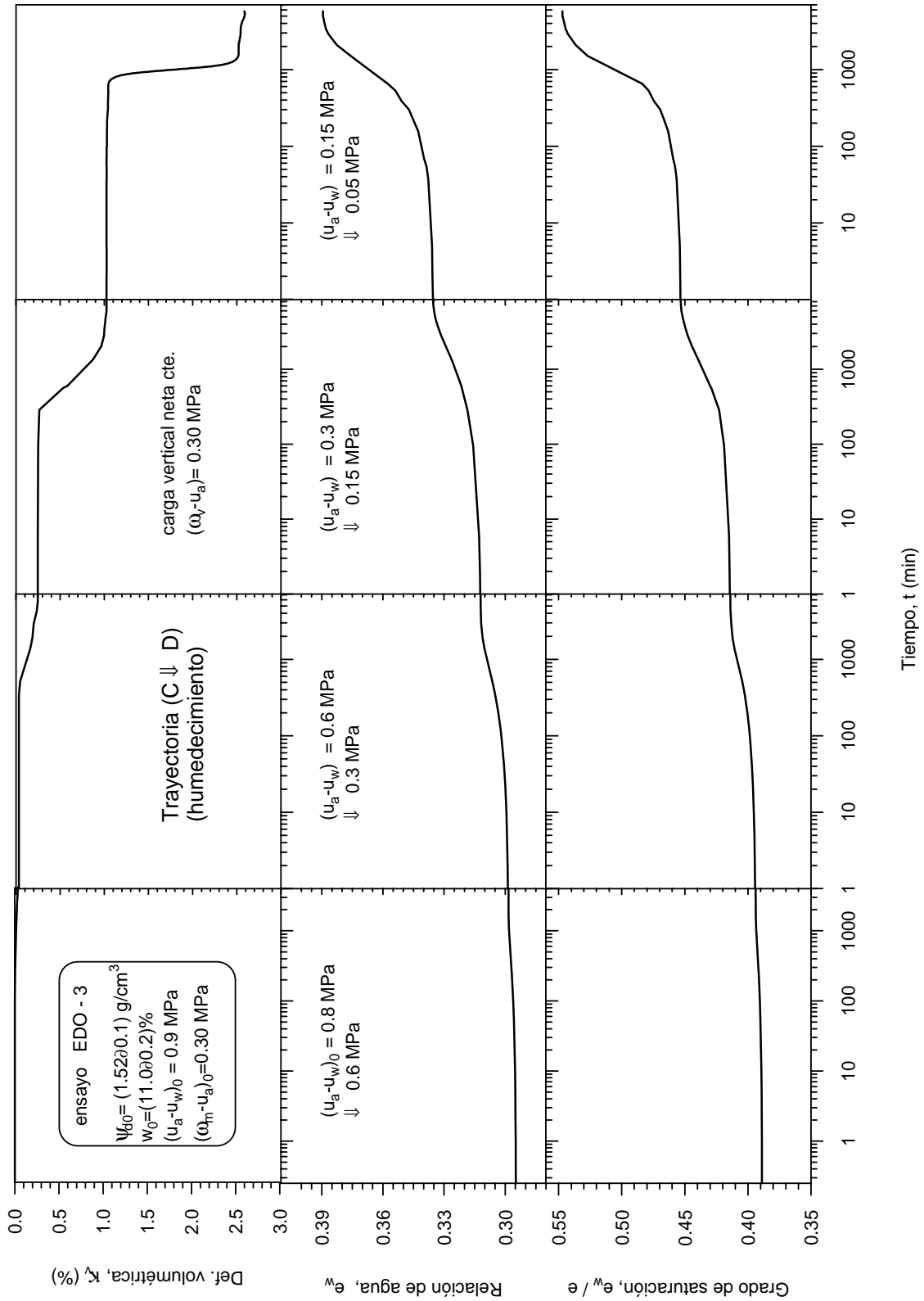


Figura 6.15 Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C \Downarrow D), bajo carga vertical constante $(\omega_y - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-3.

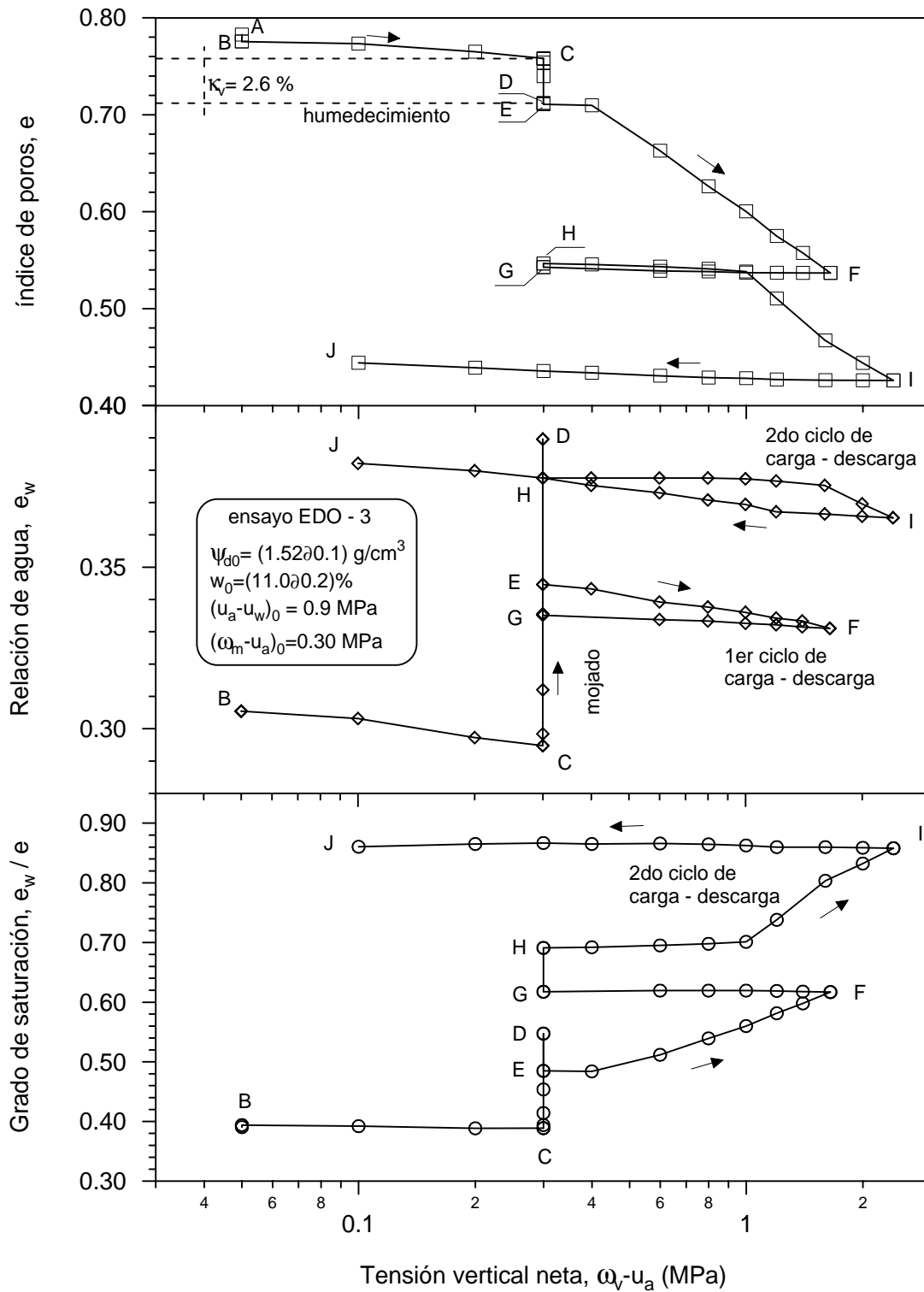


Figura 6.16 Variación del índice de poros, relación de agua, y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de humedecimiento-secado, y carga-descarga del ensayo EDO-3.

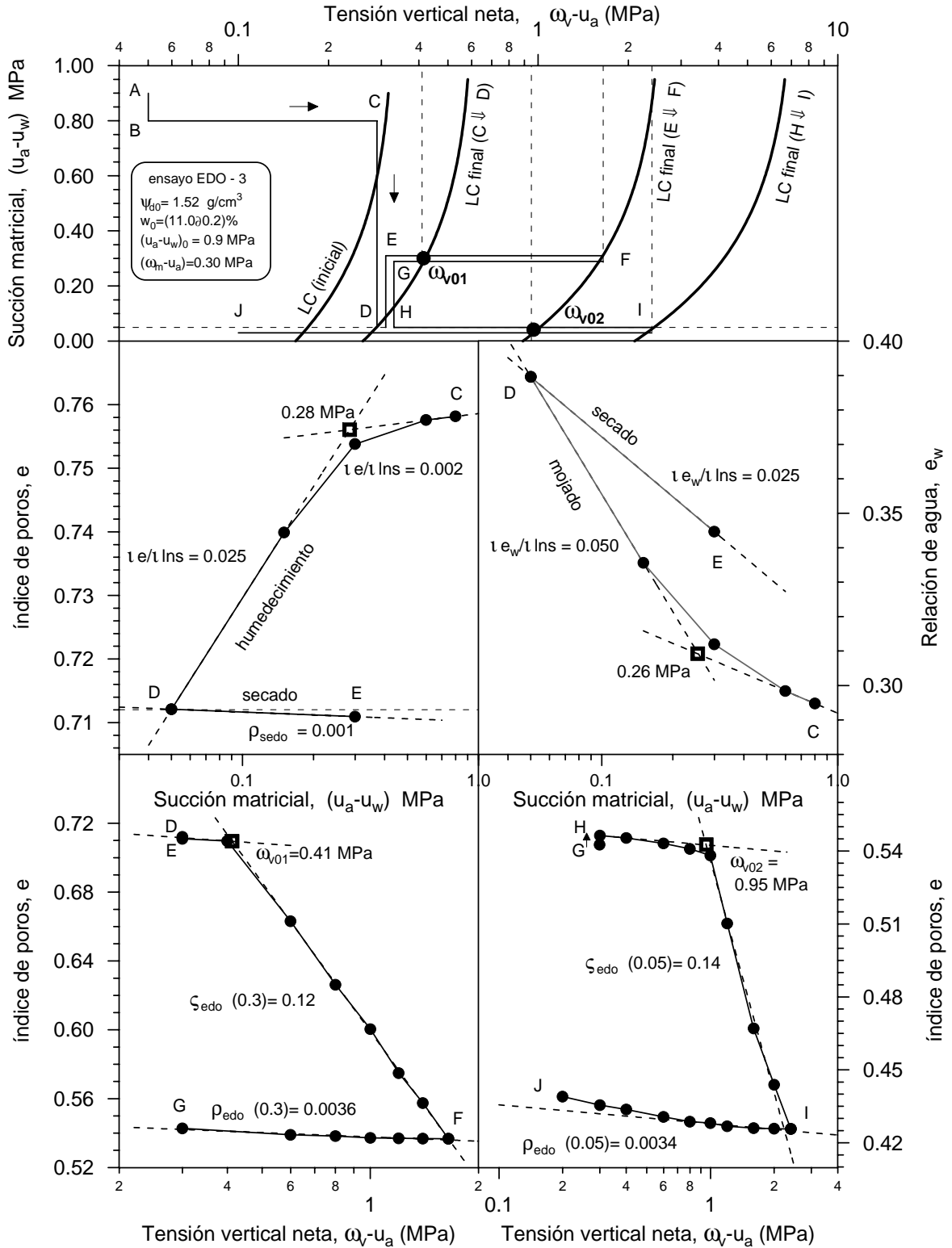


Figura 6.17 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_v - u_a)$, ensayo EDO-3.

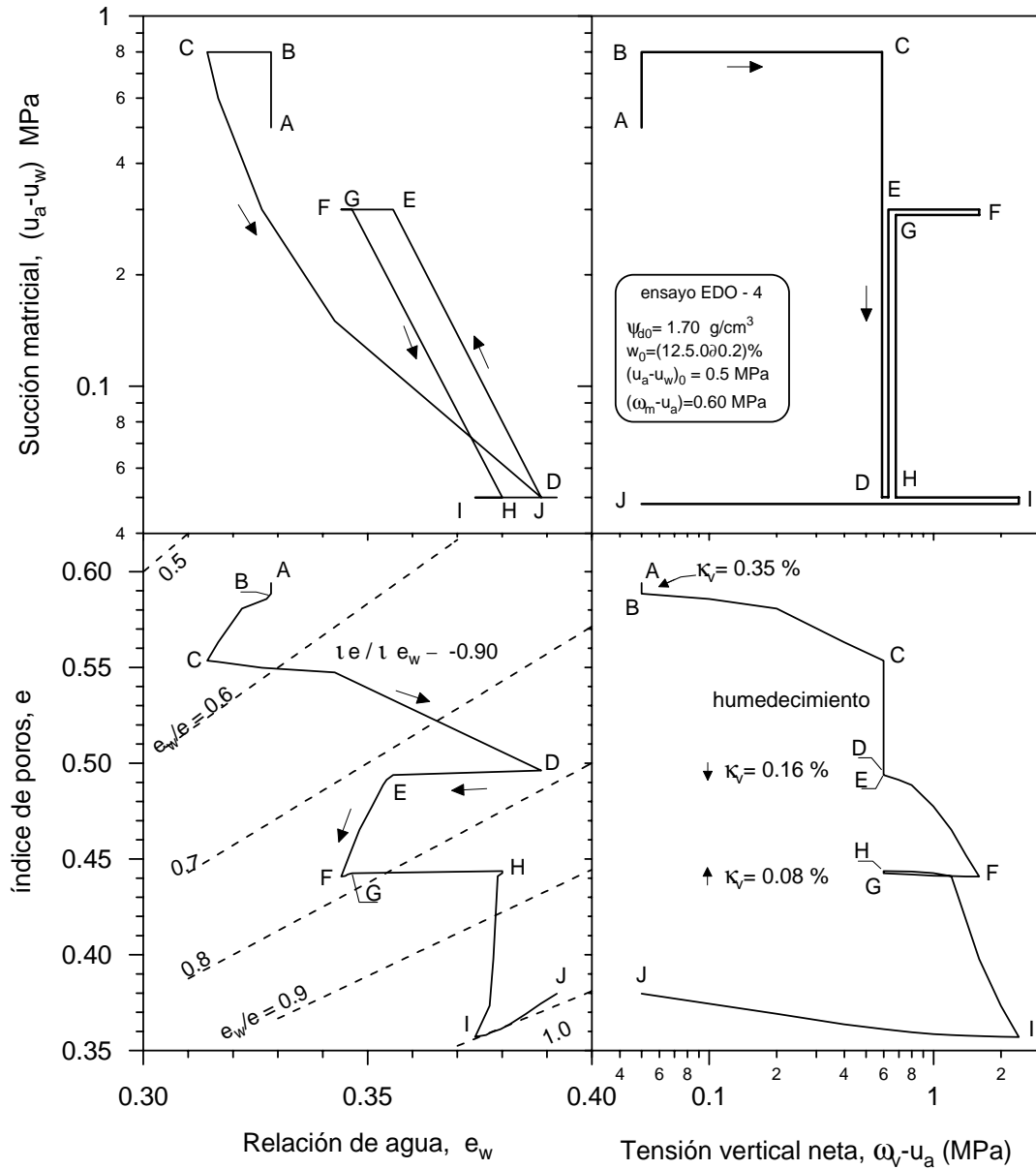


Figura 6.18 Trayectorias de humedecimiento–secado, y carga–descarga en el ensayo EDO-4. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables de esfuerzos y volumétricas conjugadas).

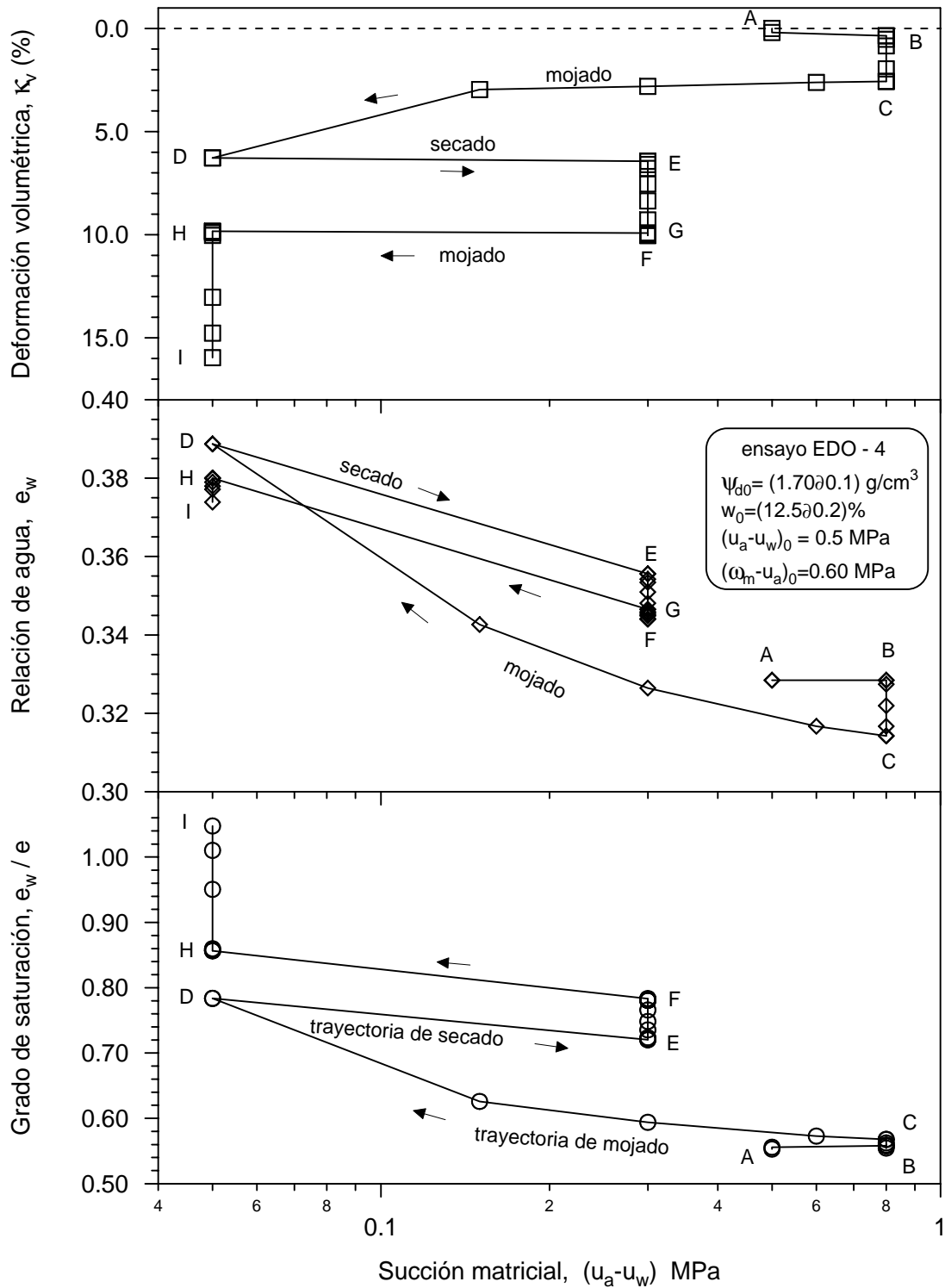


Figura 6.19 Variación de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación de las diferentes etapas de equilibrio, ensayo EDO-4.

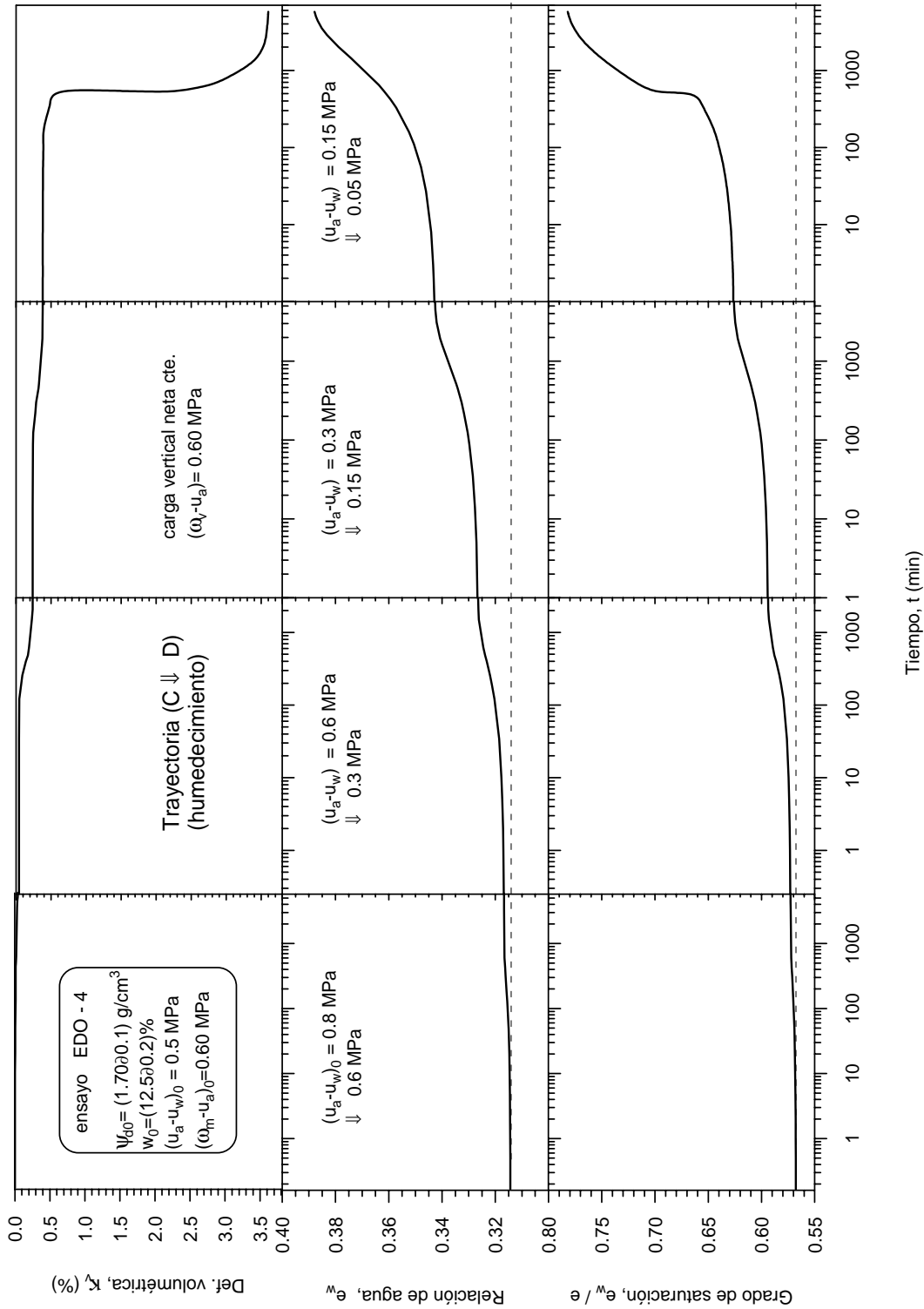


Figura 6.20 Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua, y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C ↓ D), bajo carga vertical constante $(\omega_v - u_a) = 0.6$ MPa. Ensayo EDO-4.

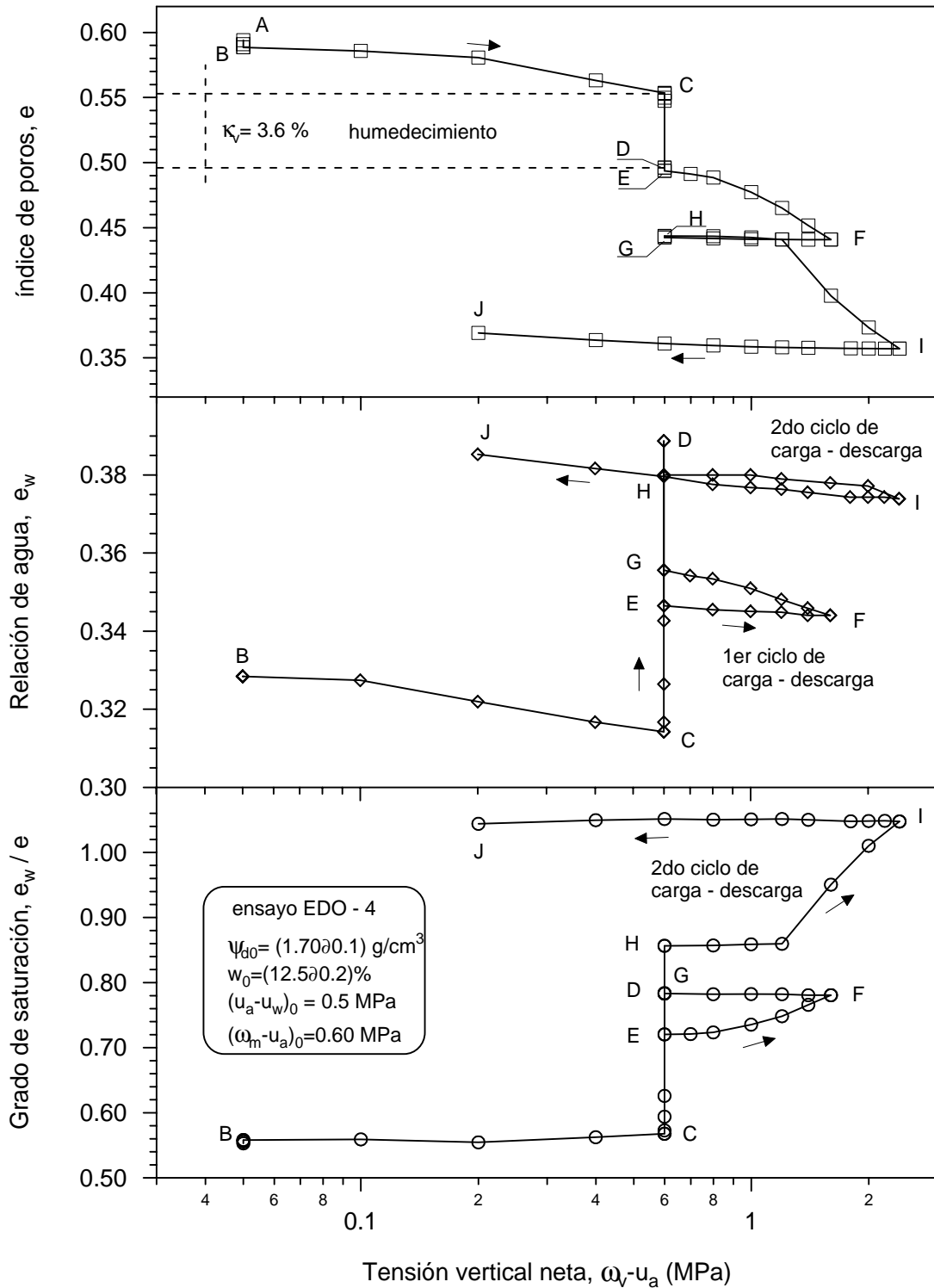


Figura 6.21 Variación del índice de poros, relación de agua, y grado de saturación en función de la carga vertical neta, para las trayectorias de humedecimiento-secado, y carga-descarga del ensayo EDO-4.

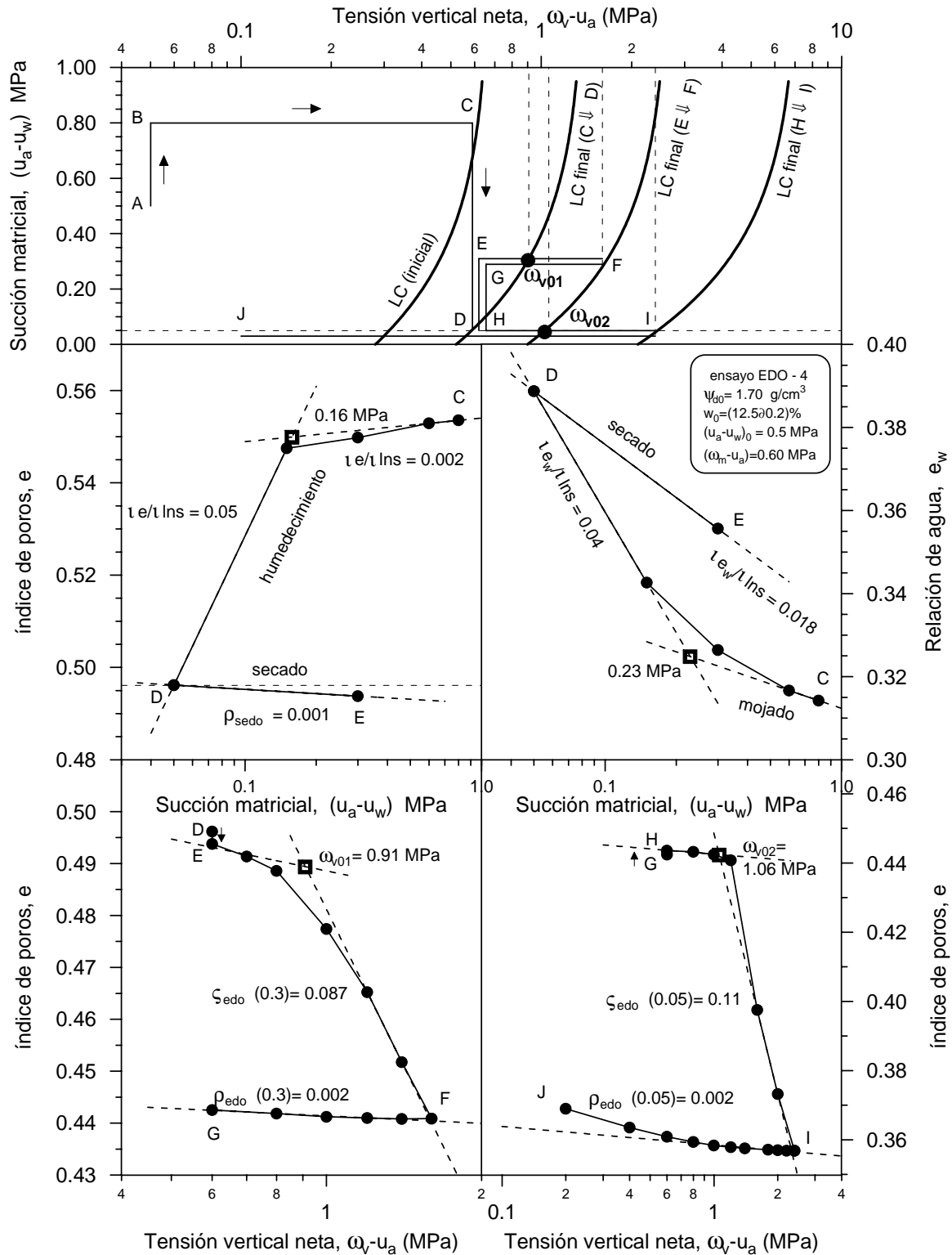


Figura 6.22 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos del esfuerzo vertical neto en los ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_v - u_a)$, ensayo EDO-4.

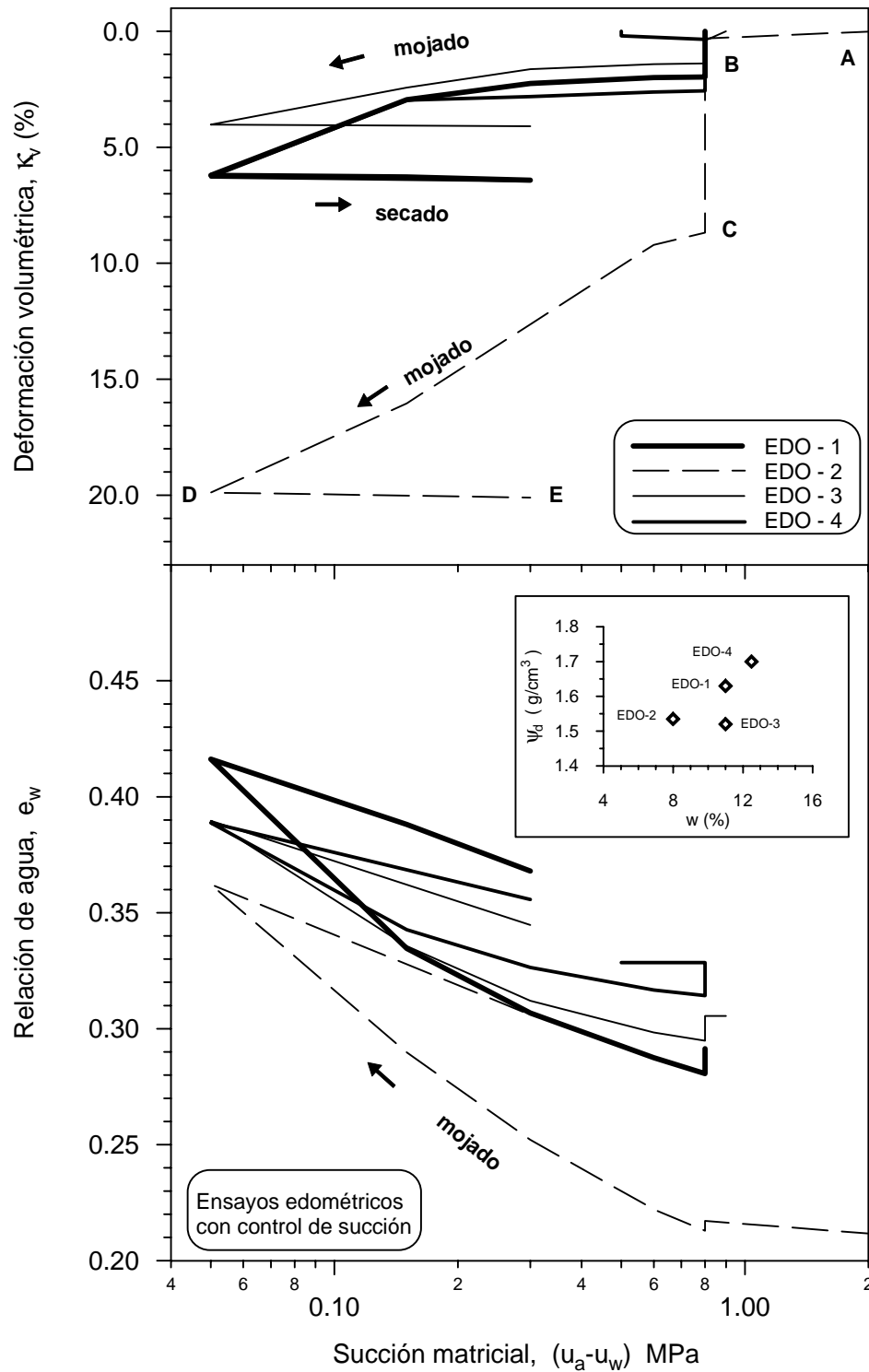


Figura 6.23 Variación de la deformación volumétrica, y relación de agua en las diferentes etapas de equilibrio de los ensayos edométricos en la trayectoria de humedecimiento y secado.

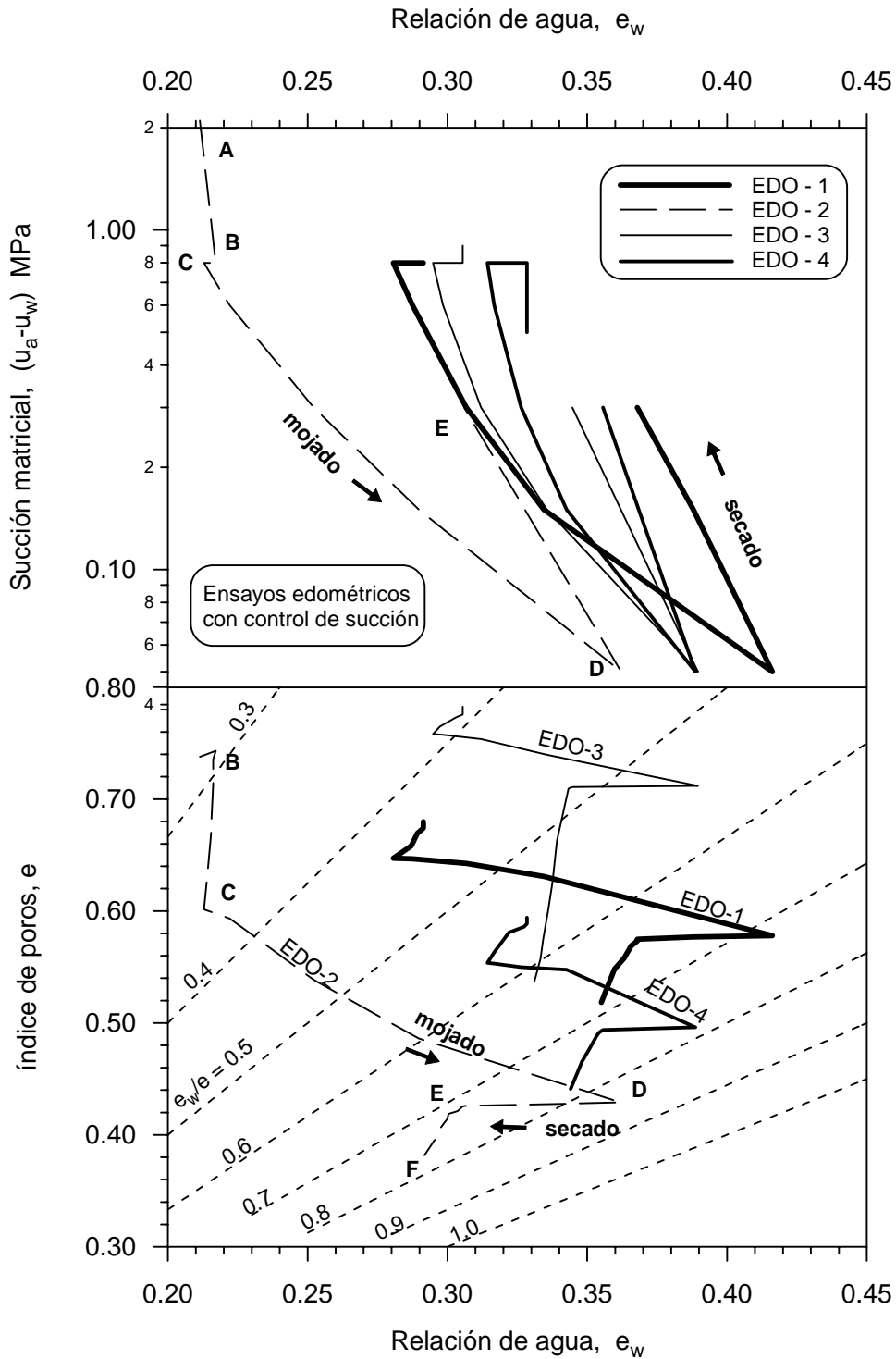


Figura 6.24 Variación de la succión matricial, e índice de poros con respecto a la relación de agua de los ensayos edométricos (trayectoria de esfuerzo de A hasta E).

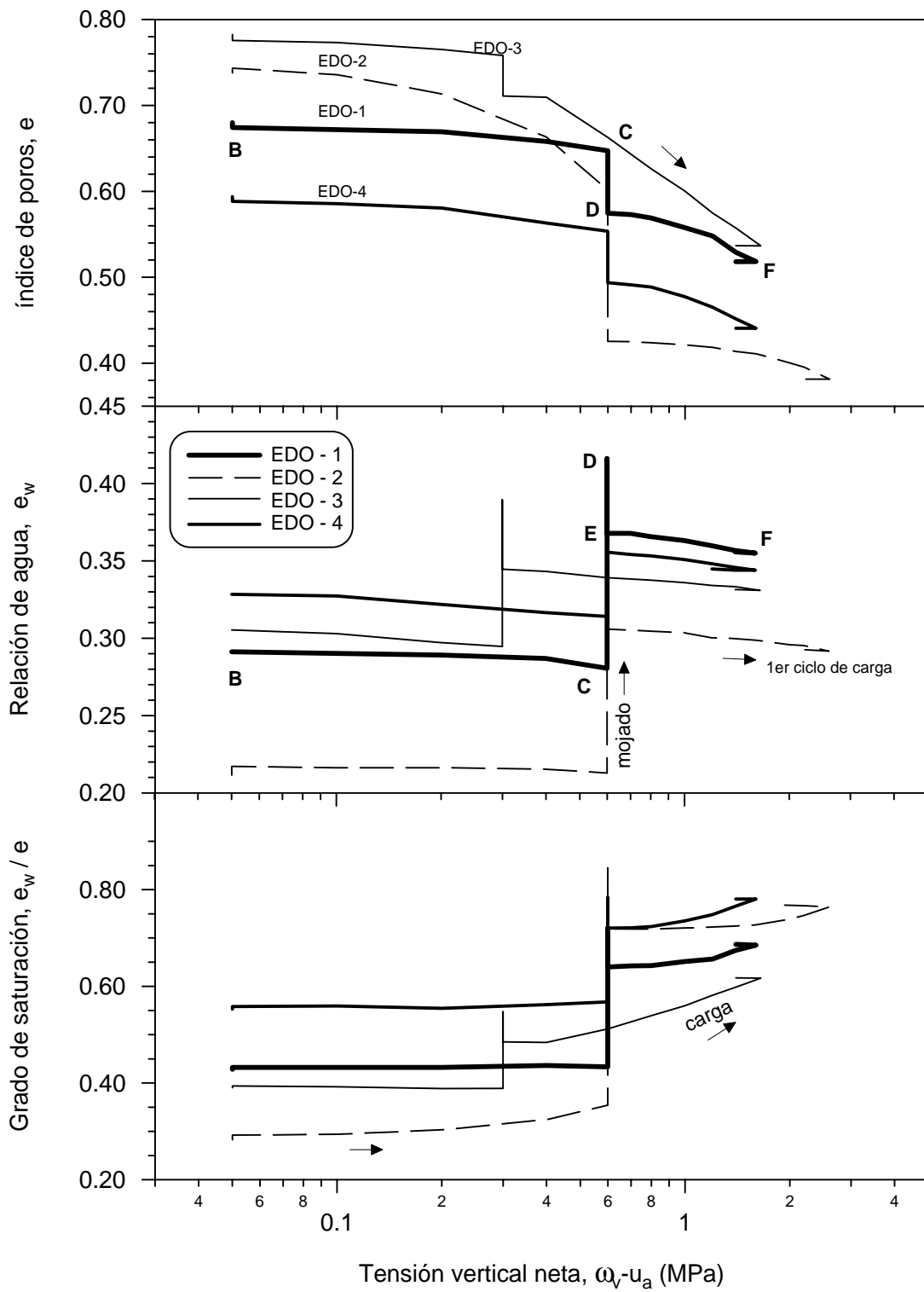


Figura 6.25 Variación del índice de poros, relación de agua, y grado de saturación con respecto al esfuerzo vertical neto de los ensayos edométricos (trayectoria A ↓ F).

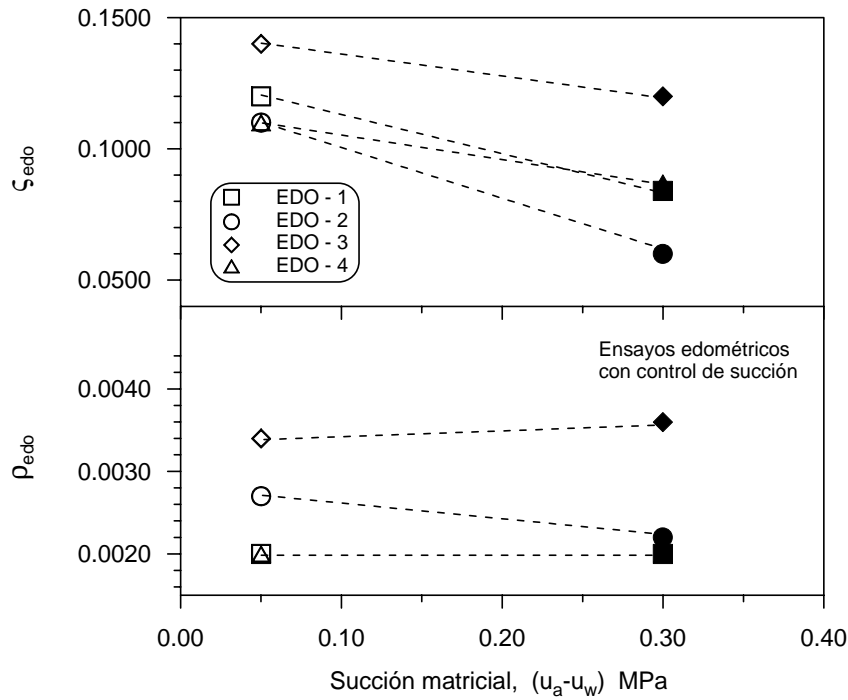


Figura 6.26 Valores de ζ_{edo} y ρ_{edo} a diferente succión matricial. Ensayos edométricos en trayectorias de carga y descarga.

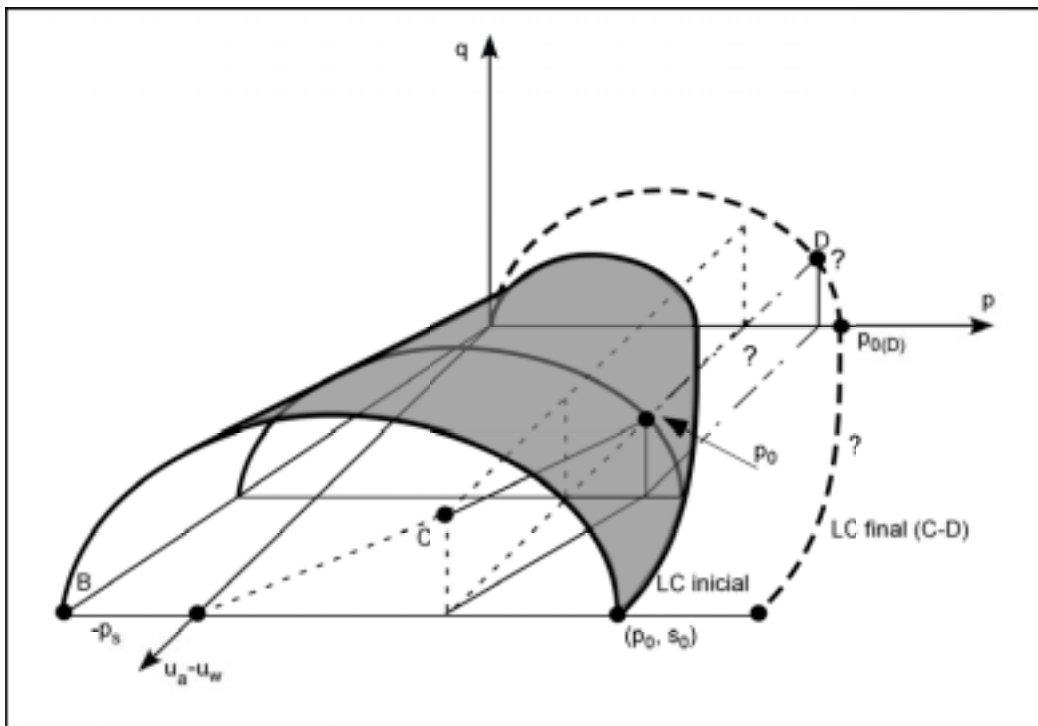


Figura 6.27 Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de esfuerzos (p, q, s) . Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia para los ensayos edométricos en las trayectorias $(B \downarrow C)$ y $(C \downarrow D)$.

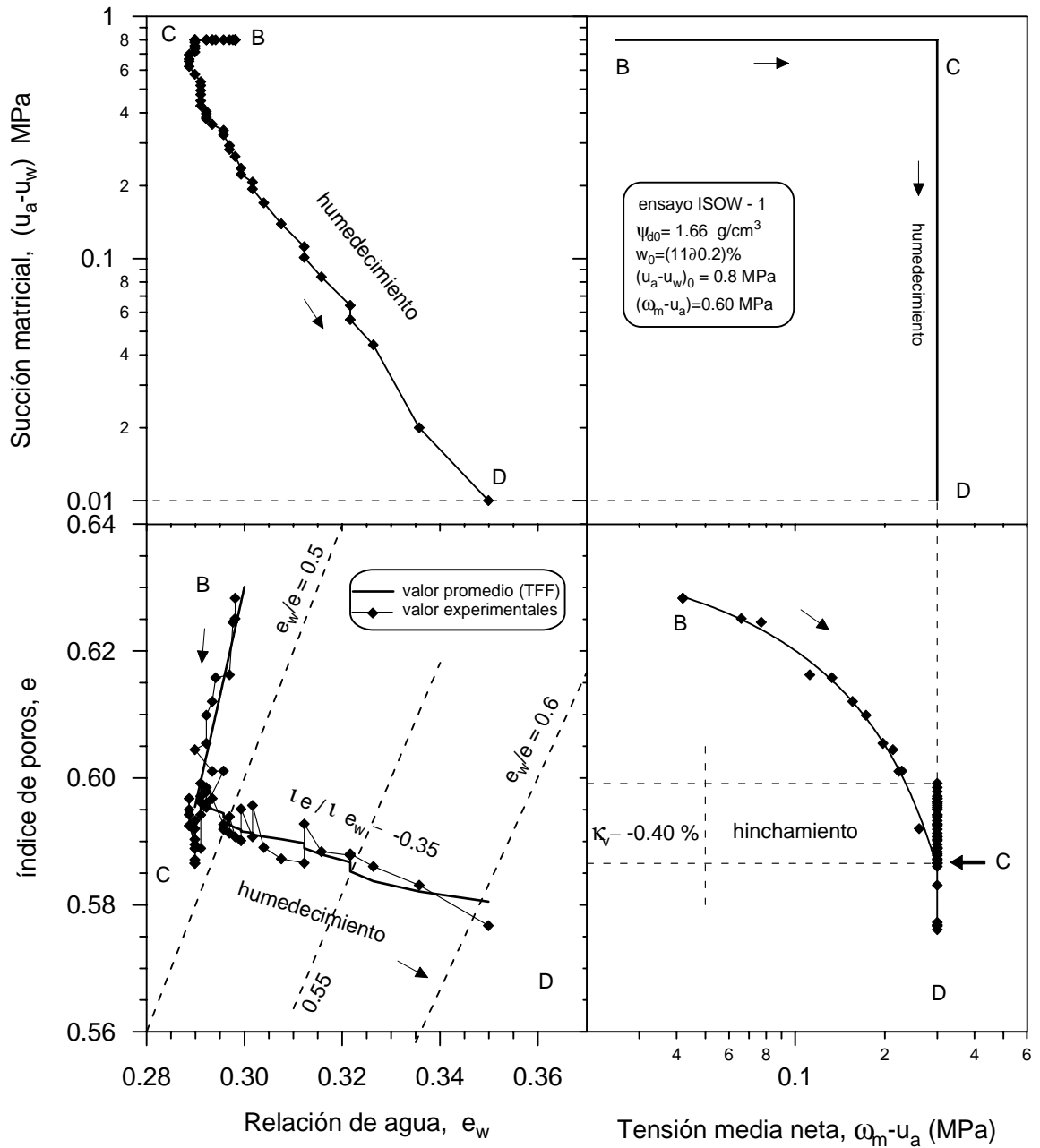


Figura 6.28 Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotrópica, representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCD, ensayo ISOW-1.

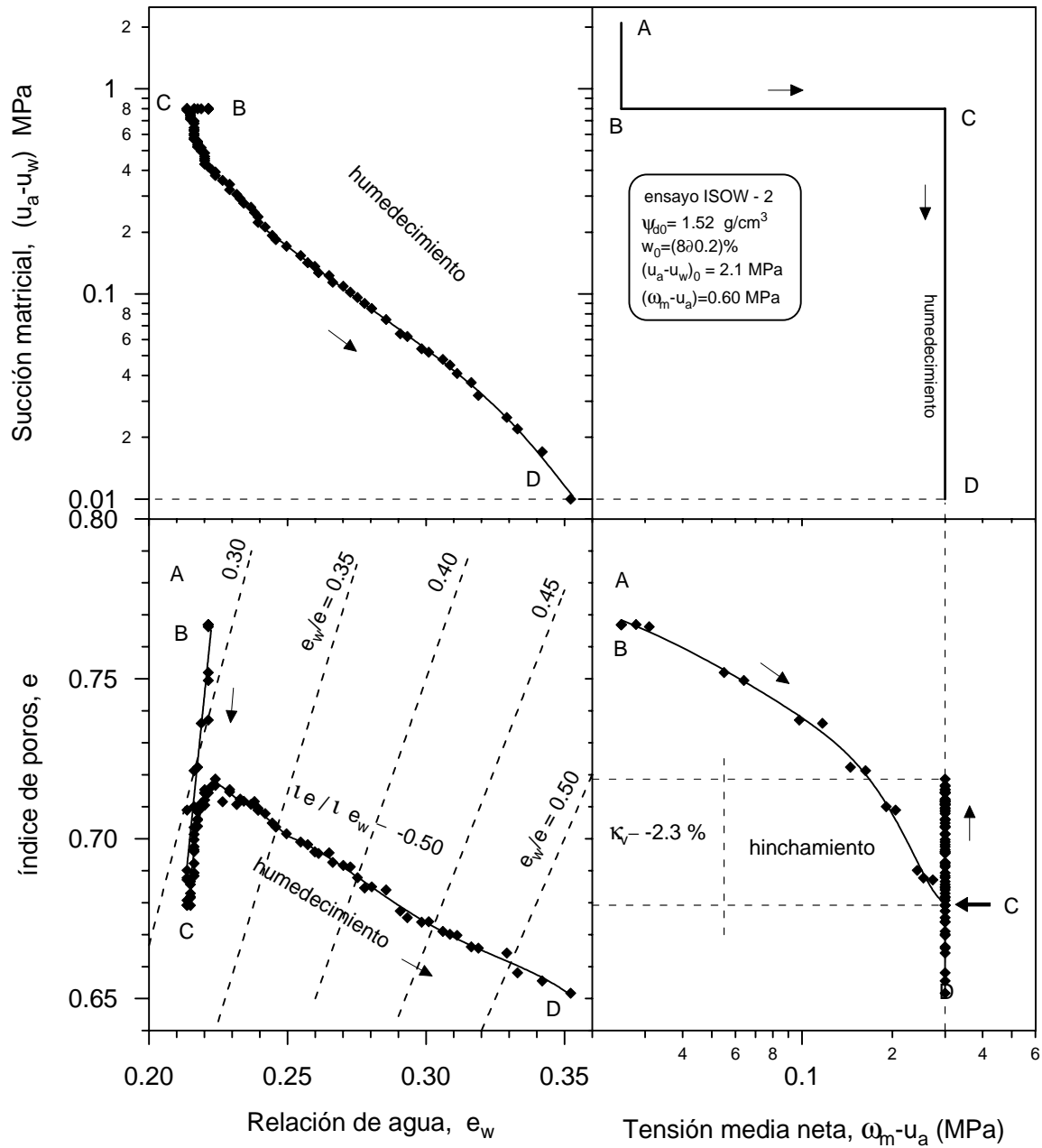


Figura 6.29 Resultados isotrópos obtenidos con la Mini-célula isotrópa, representados en el plano s : $(\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria ABCD, ensayo ISOW-2.

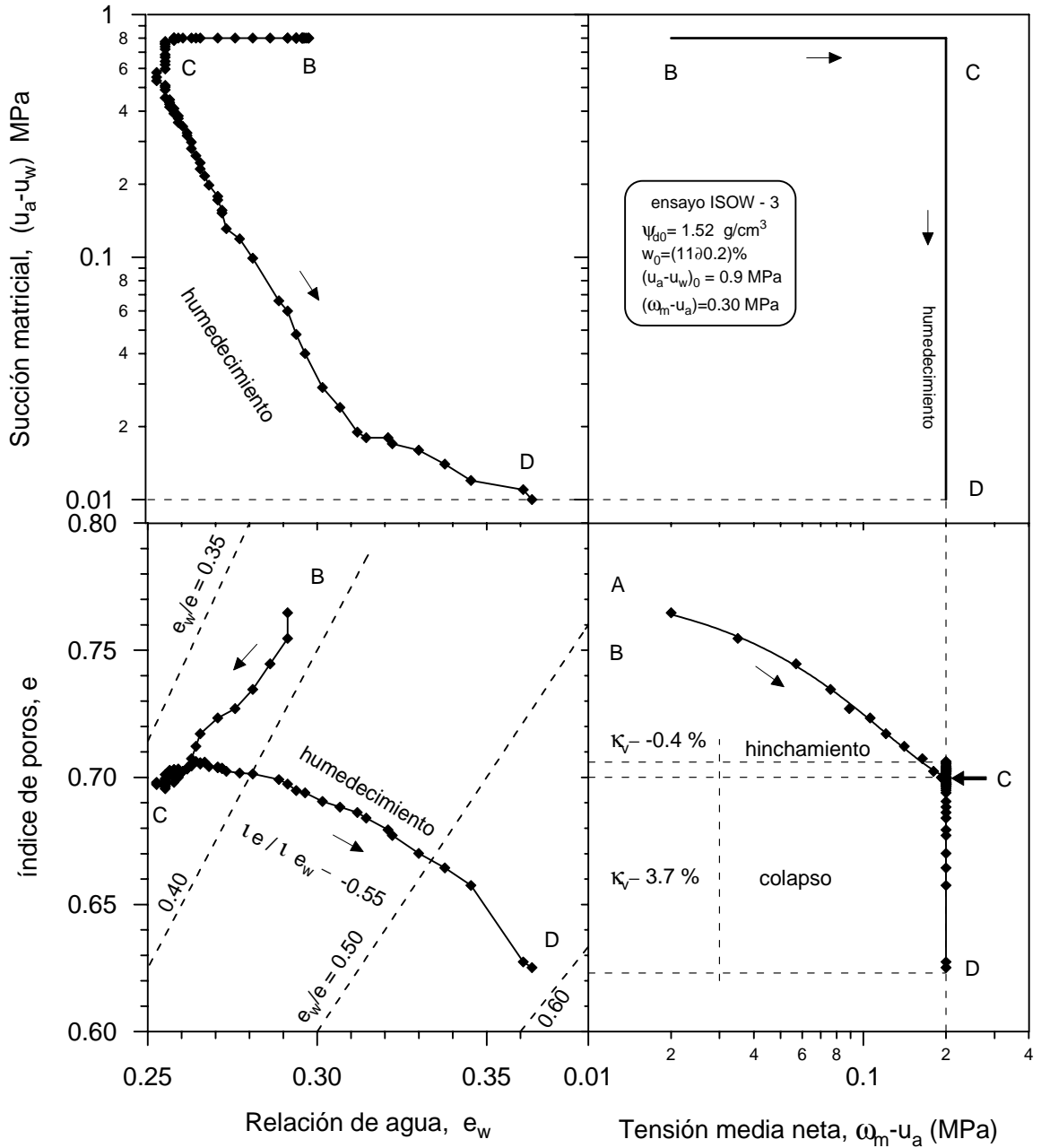


Figura 6.30 Resultados isotrópicos representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCD ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotrópica).

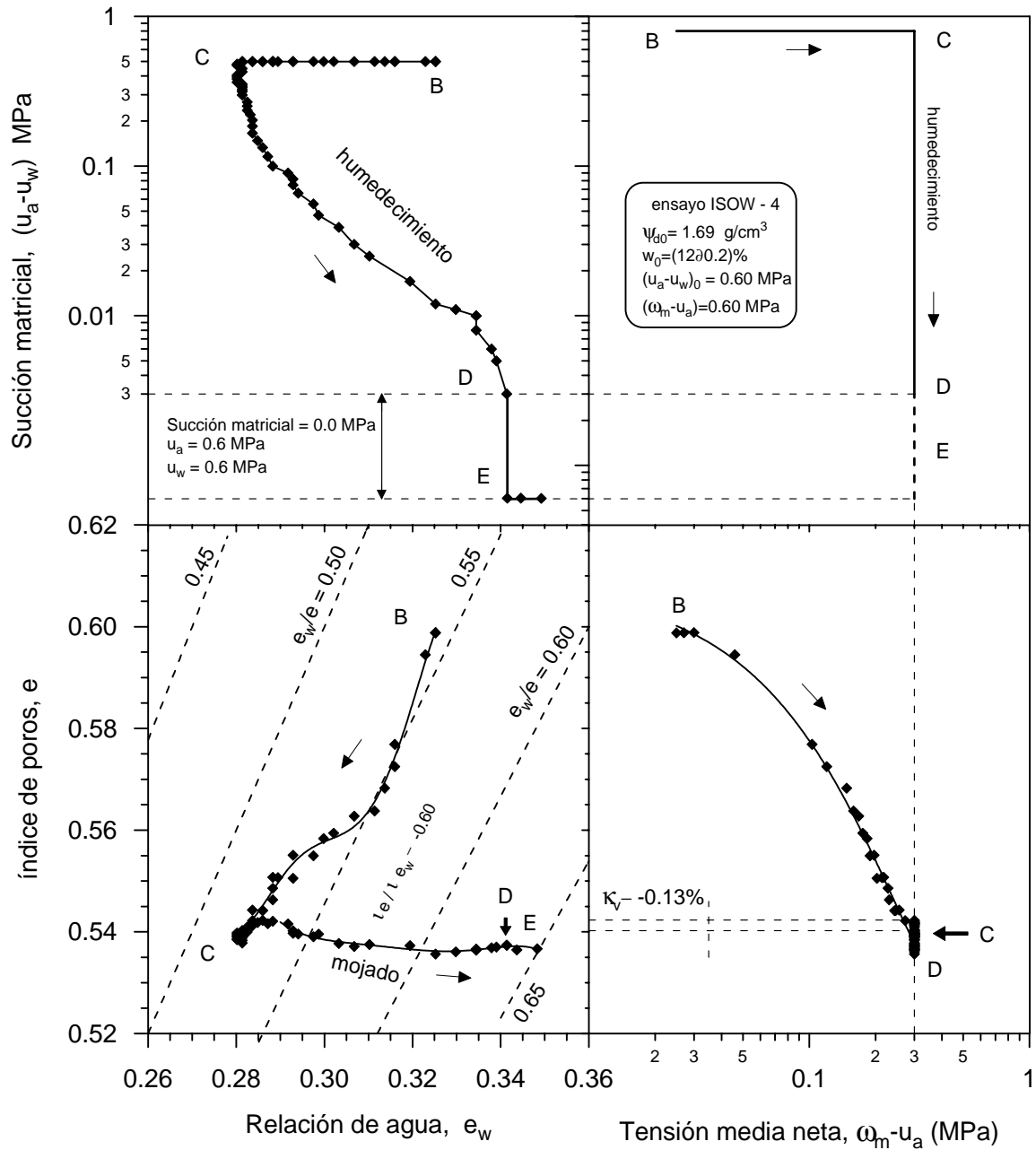


Figura 6.31 Resultados isotrópicos representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCDE ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotrópica).

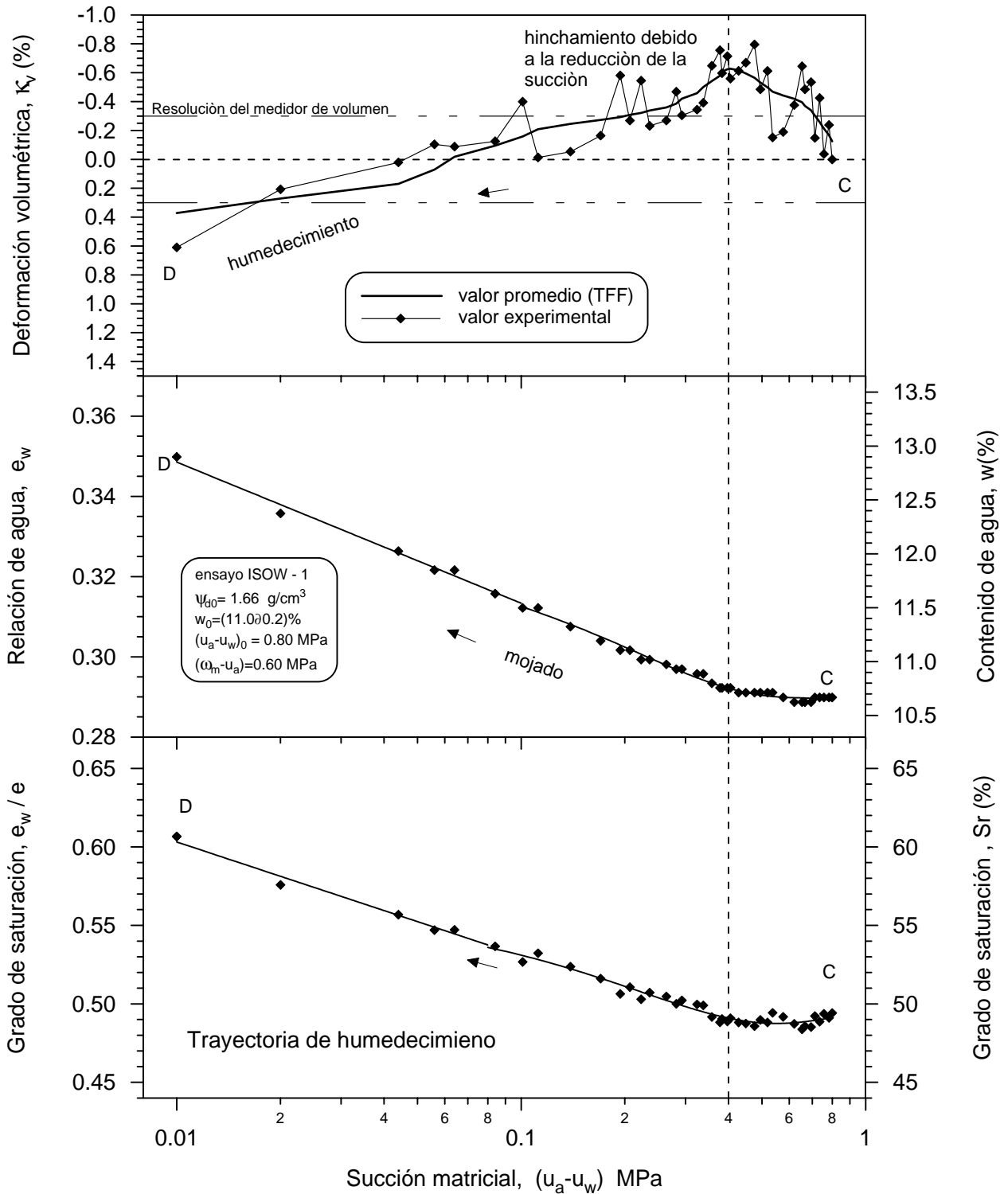


Figura 6.32 Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$. Trayectoria CD ensayo ISOW-1 (Mini-célula isotropa).

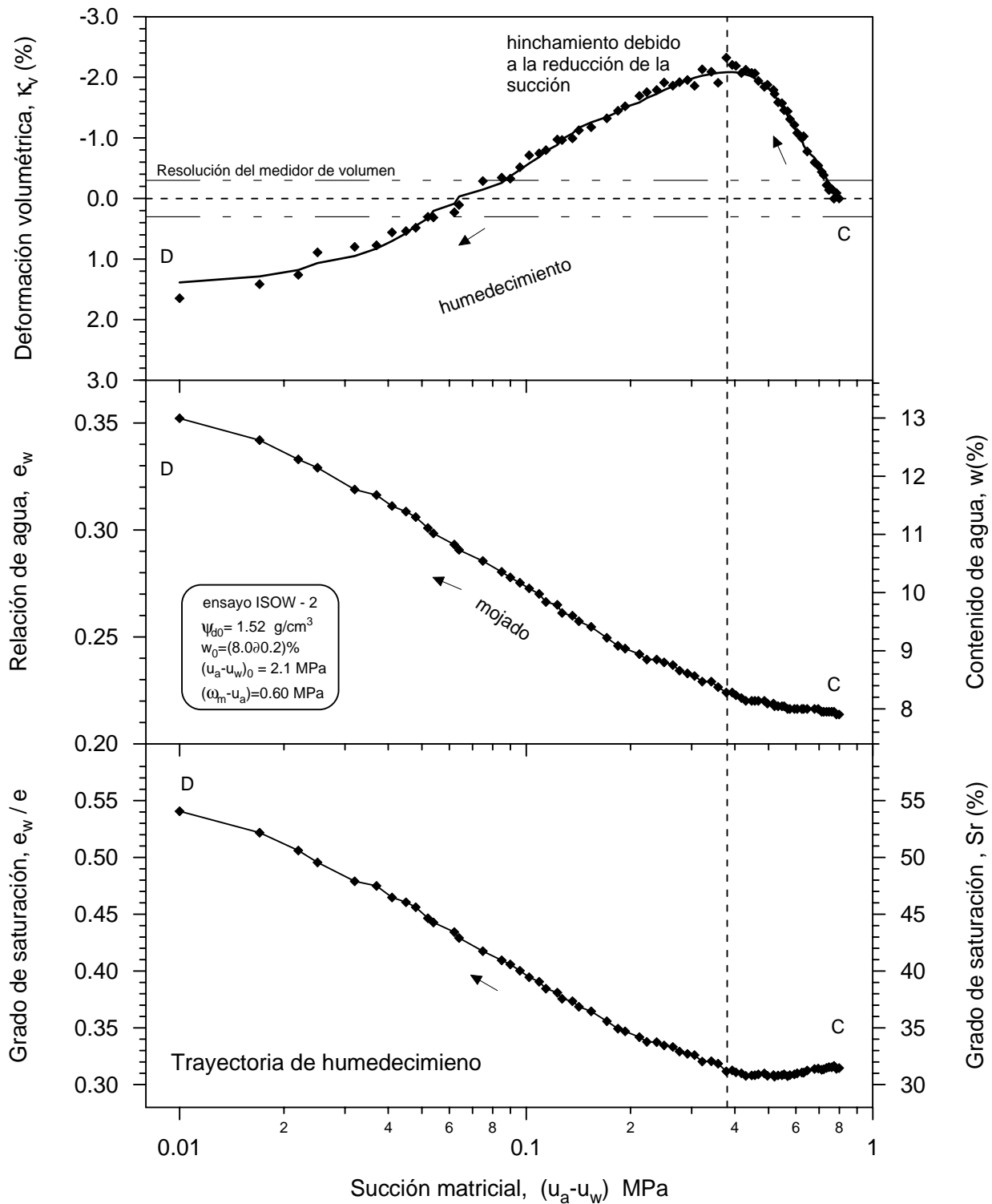


Figura 6.33 Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.3 \text{ MPa}$. Trayectoria CD, ensayo ISOW-2 (Mini-célula isótropa).

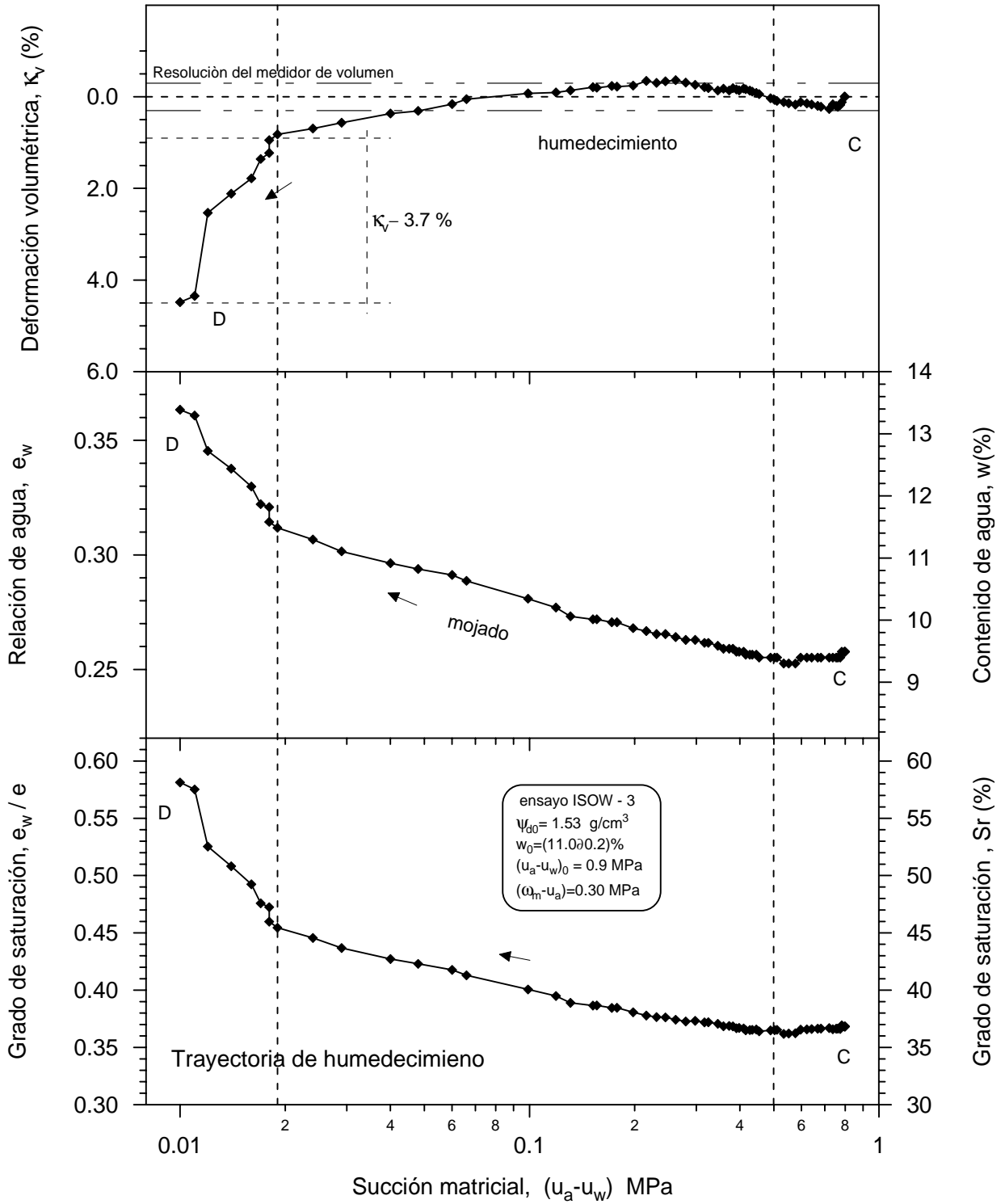


Figura 6.34 Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.2 \text{ MPa}$. Trayectoria CD, ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).

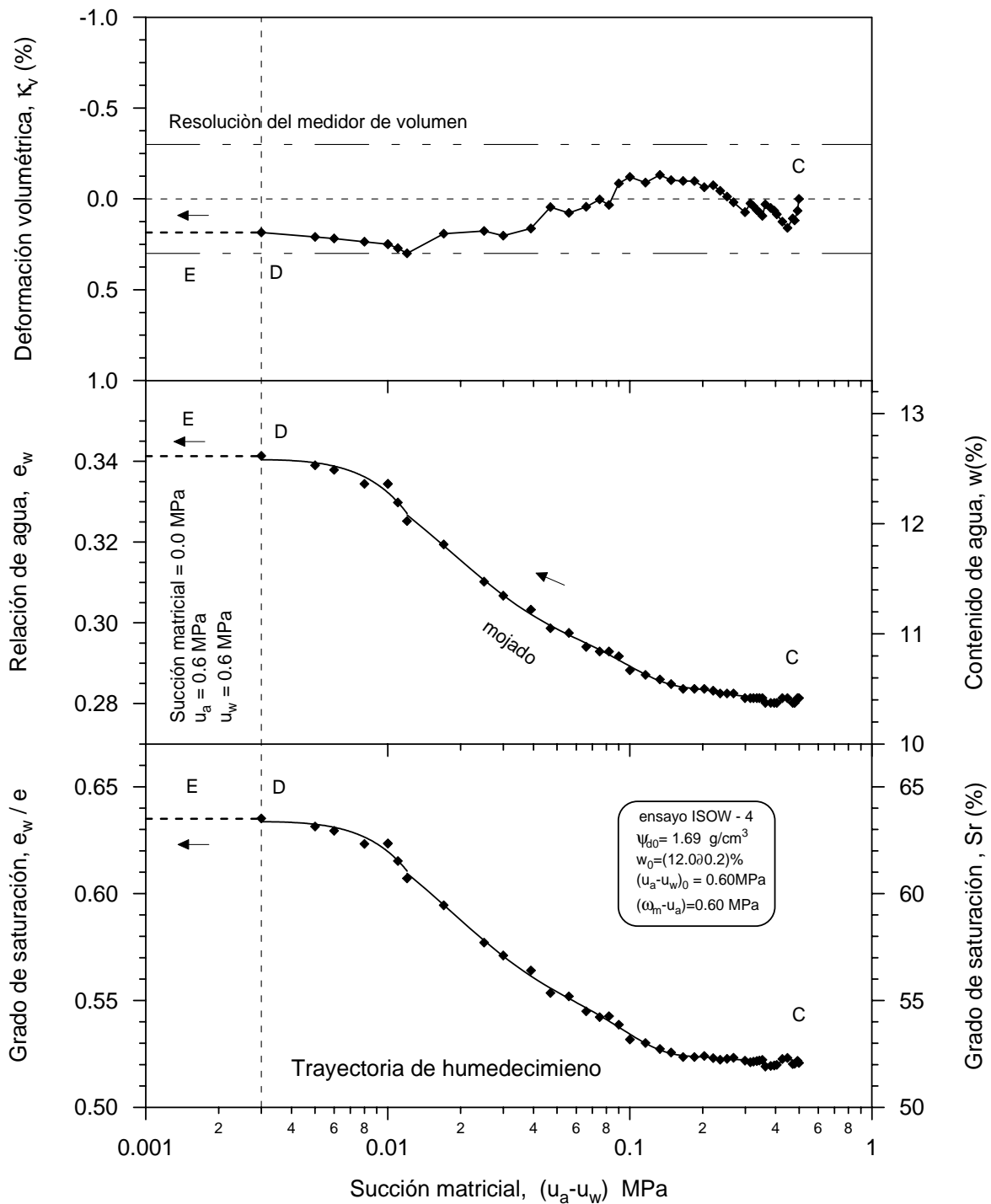


Figura 6.35 Trayectoria de humedecimiento a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.3$ MPa. Trayectoria CD, ensayo ISOW-4 (Mini-célula isótropa).

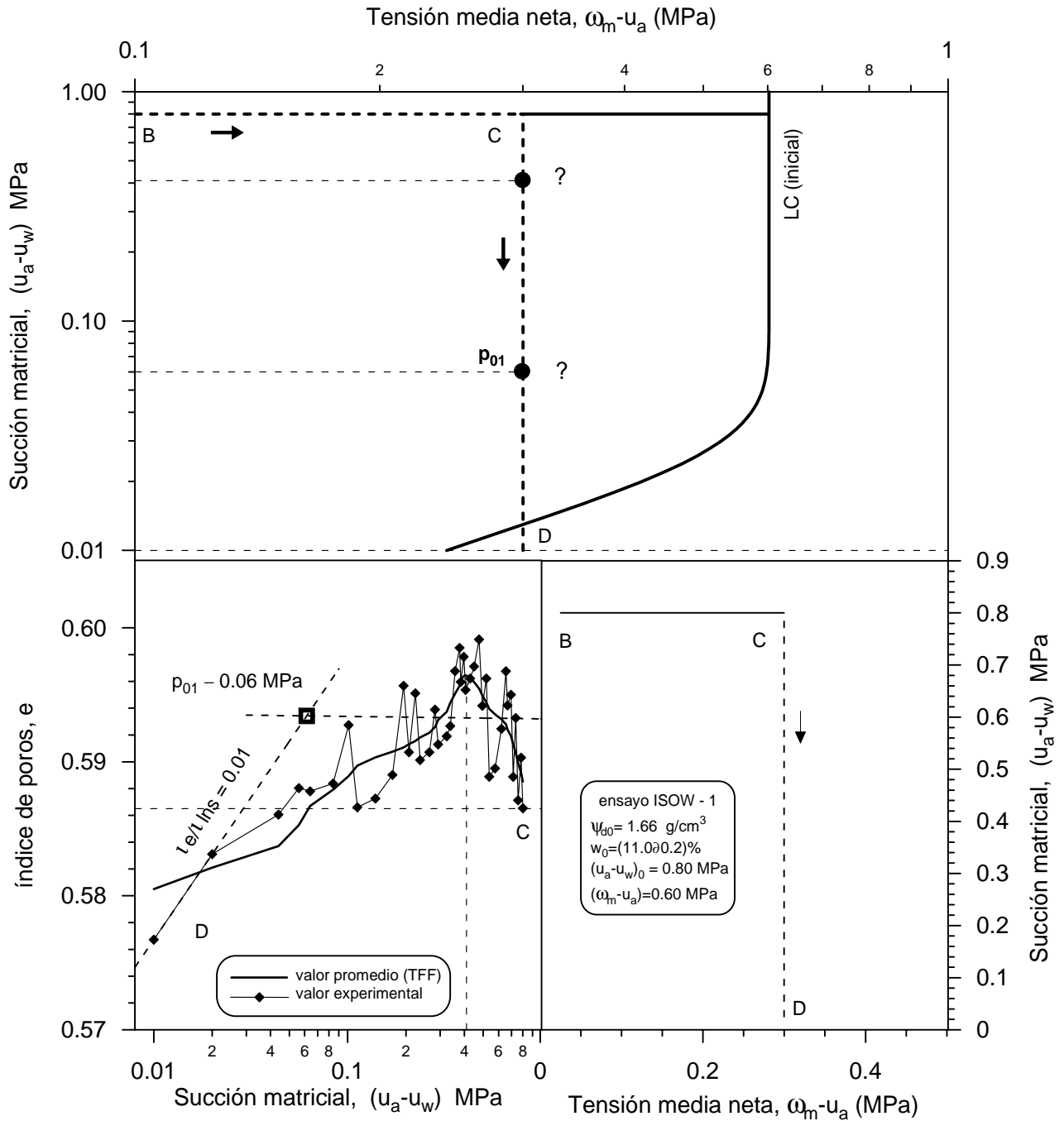


Figura 6.36 Intersección de la superficie de fluencia inicial de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-1 (Mini-célula isótropa).

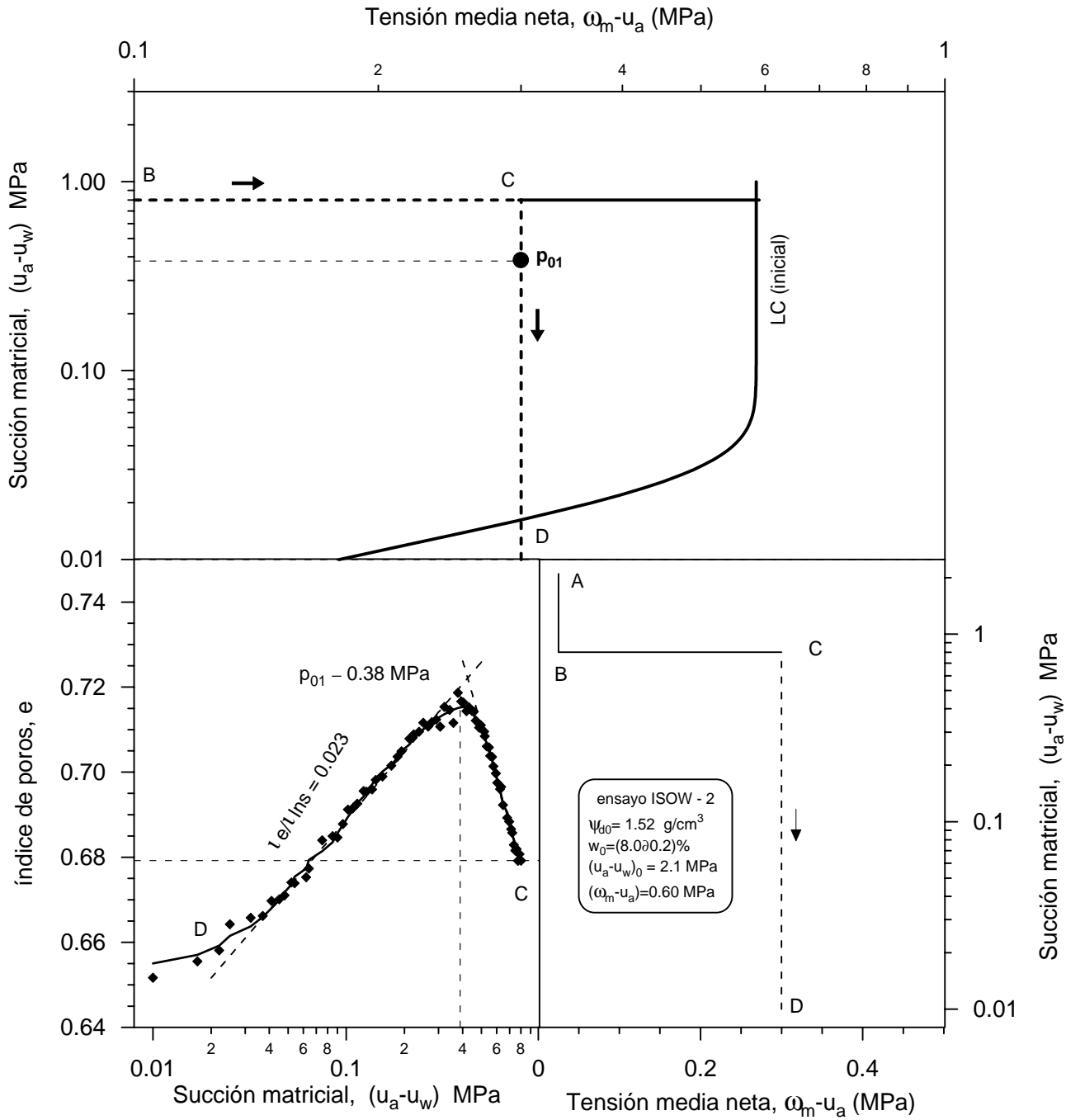


Figura 6.37 Intersección de la superficie de fluencia inicial de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-2 (Mini-célula isótropa).

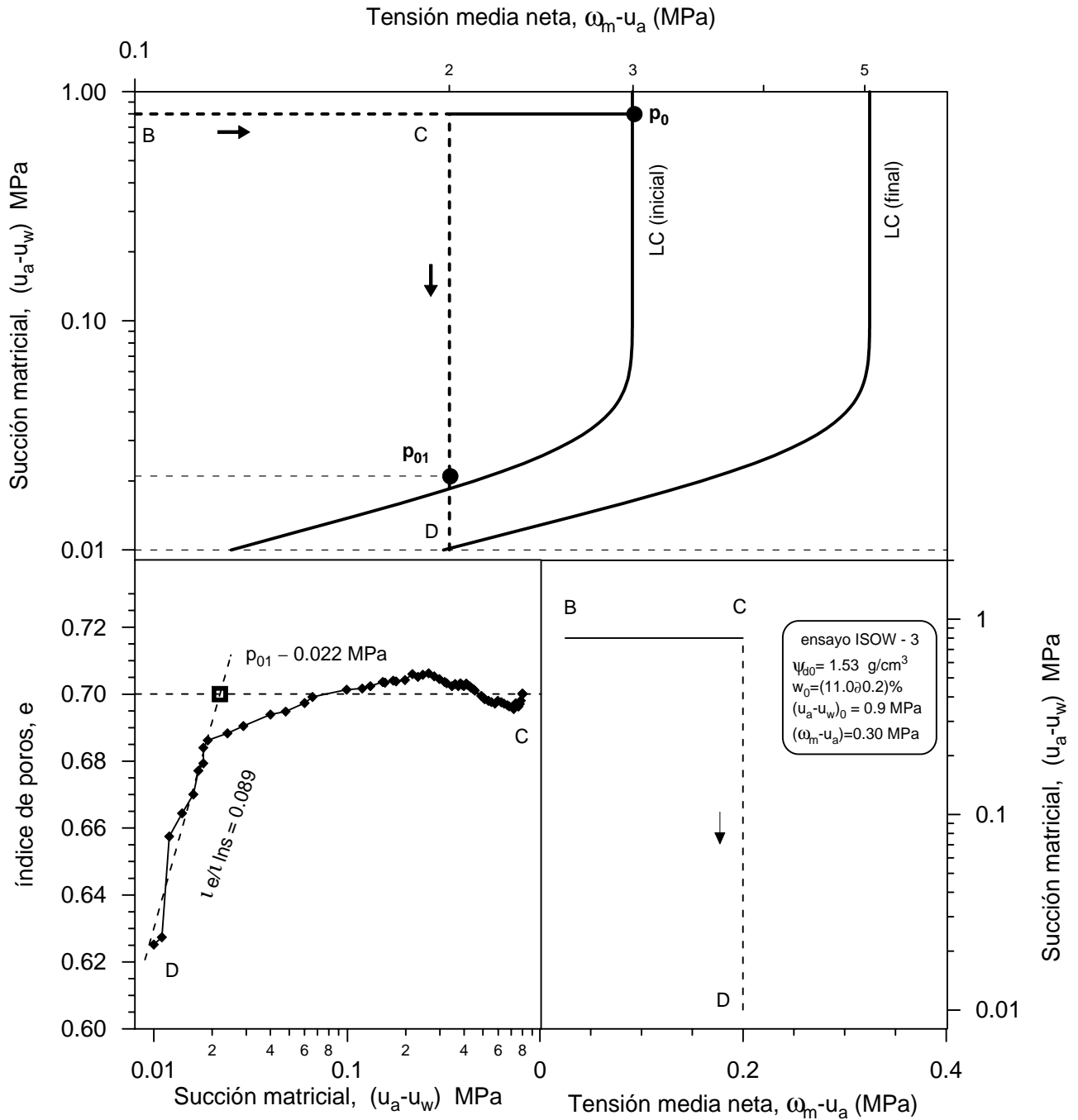


Figura 6.38 Intersección de la superficie de fluencia de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-3 (Mini-célula isótropa).

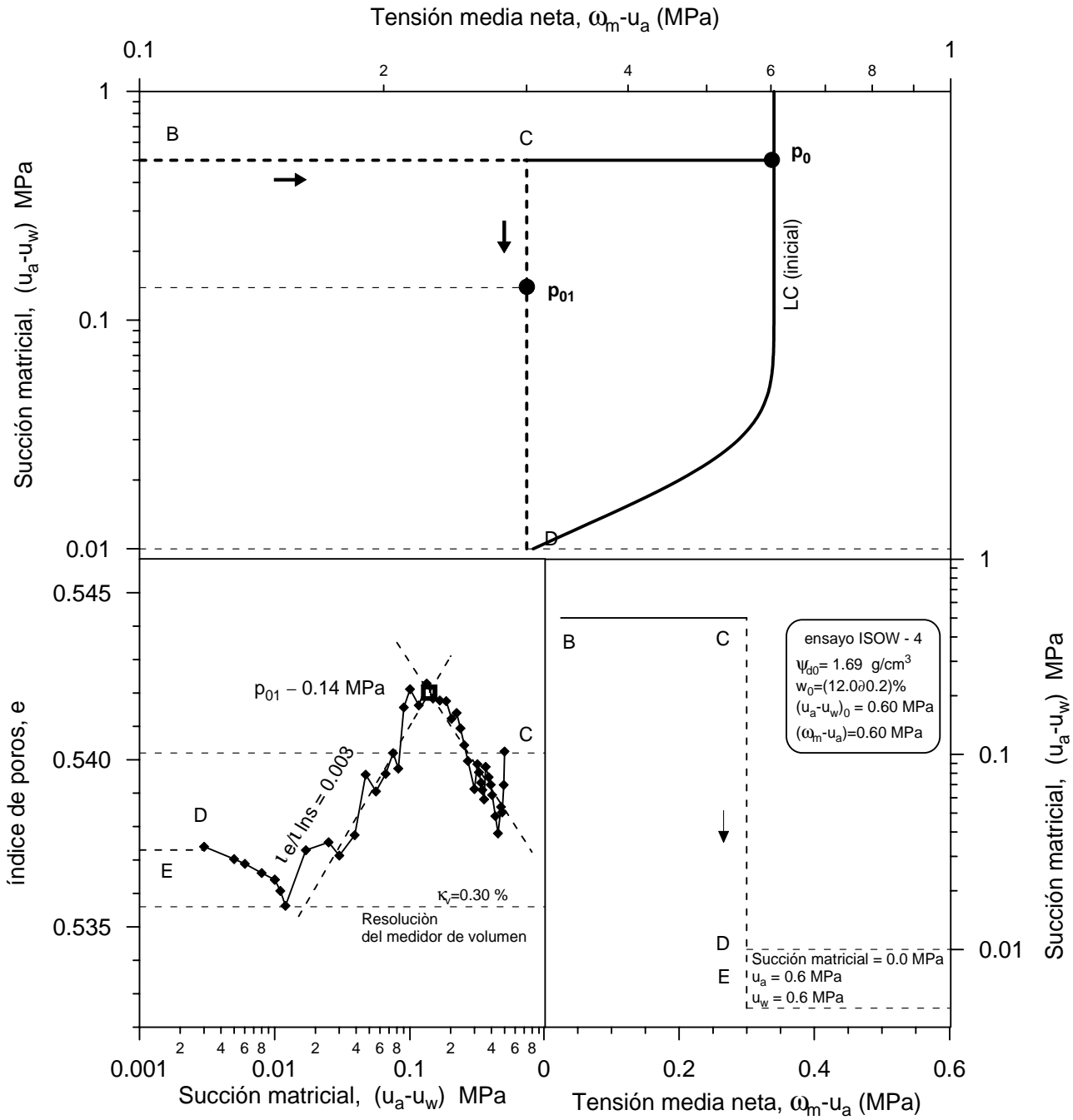


Figura 6.39 Intersección de la superficie de fluencia de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-4 (Mini-célula isótropa).

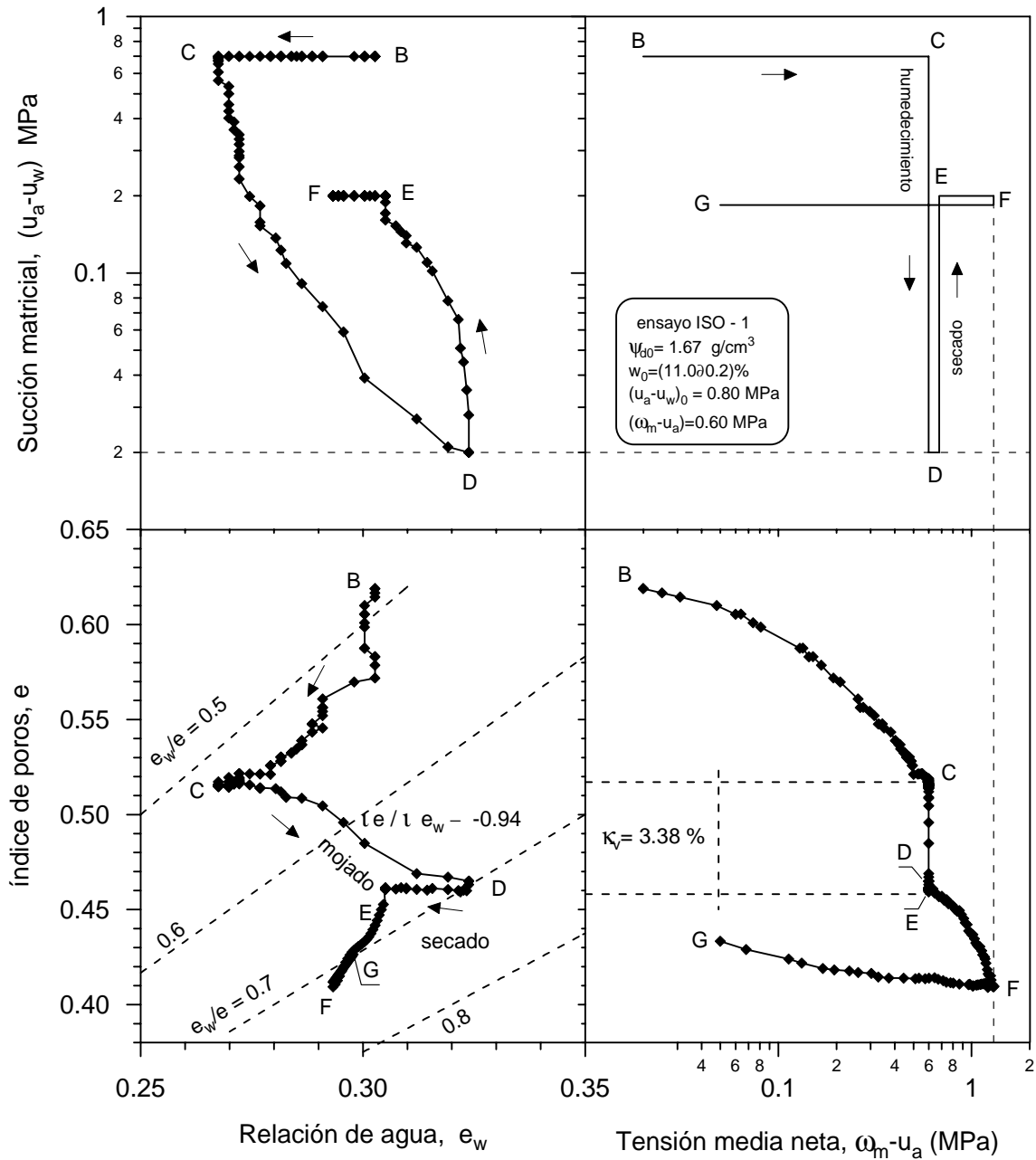


Figura 6.40 Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotrópica, representados en el plano $s : (\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCDEFG, ensayo ISO-1.

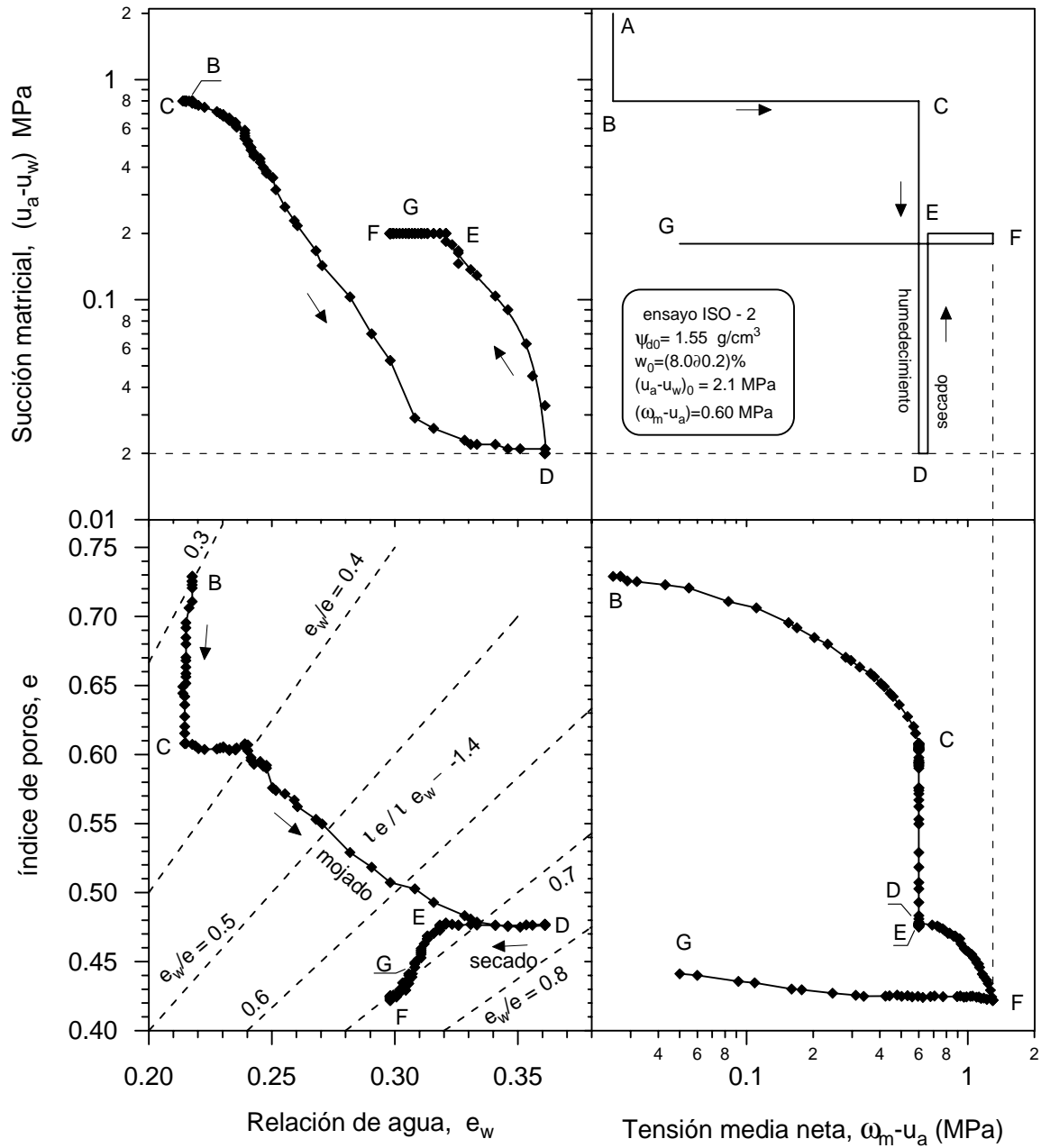


Figura 6.41 Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotrópica, representados en el plano $s : (u_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria ABCDEFG, ensayo ISO-2.

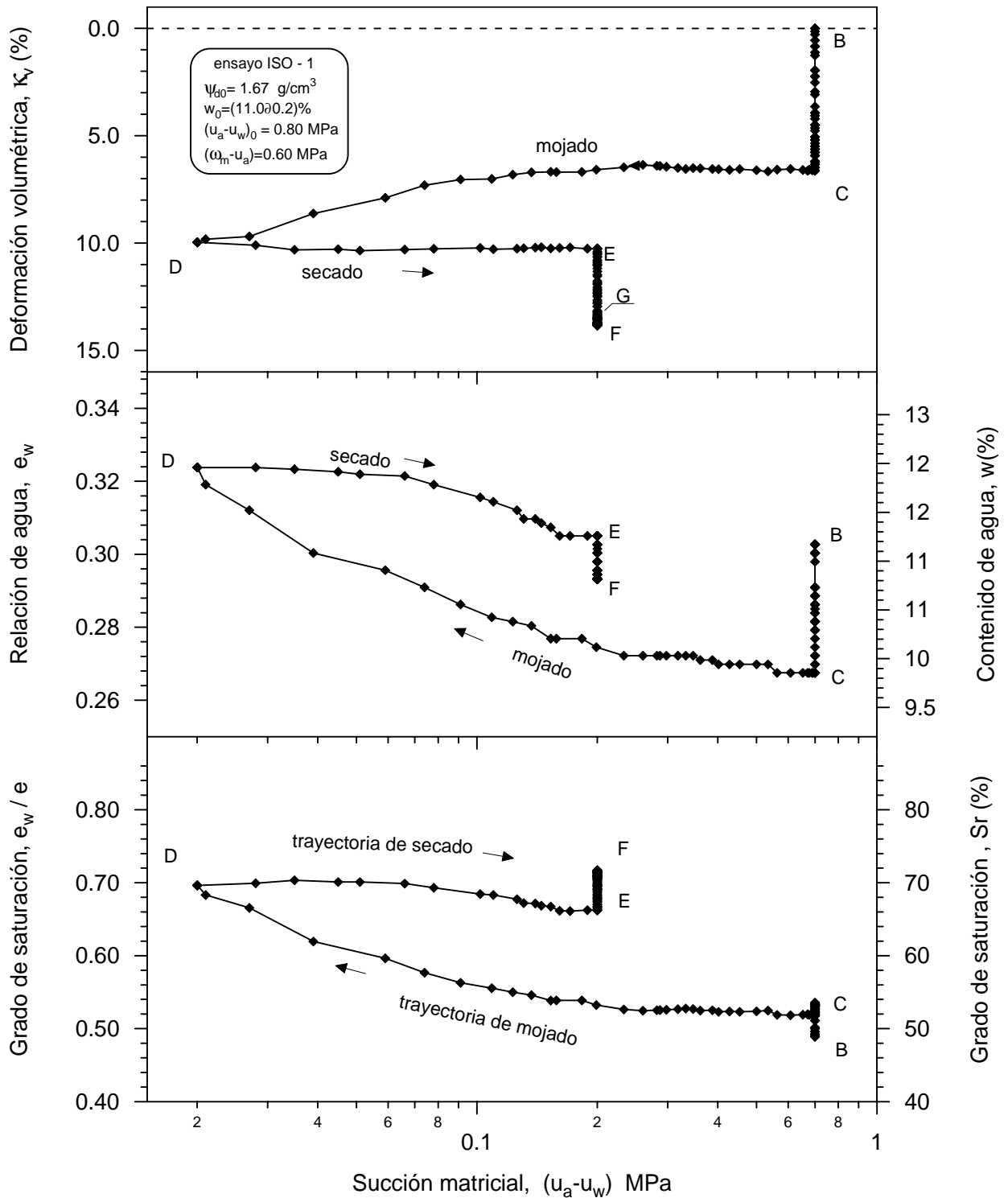


Figura 6.42 Trayectoria de humedecimiento y secado a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa. Trayectoria BCDEFG, ensayo ISO-1 (Mini-célula isótropa).

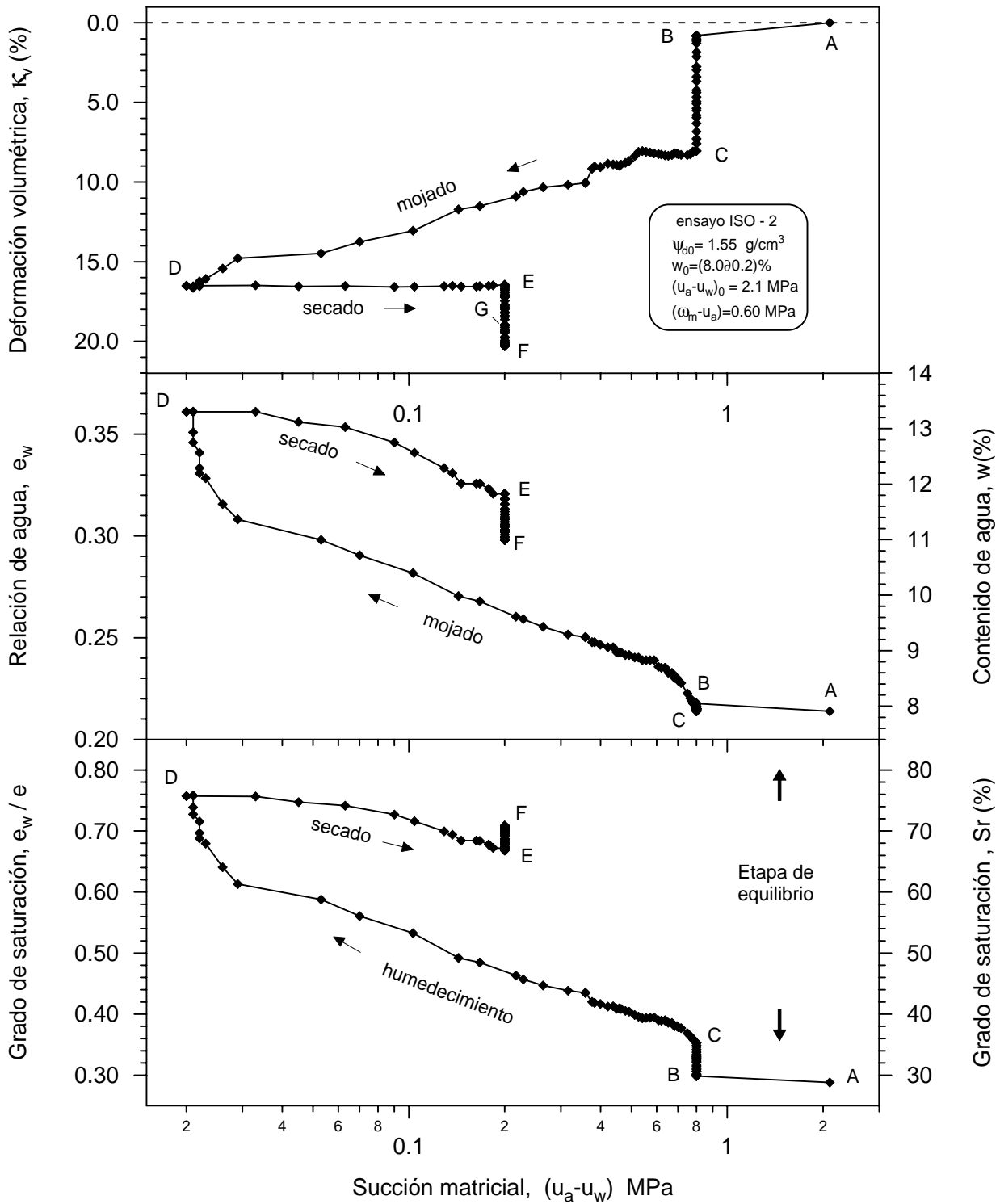


Figura 6.43 Trayectoria de humedecimiento y secado a esfuerzo medio neto constante $(\omega_m - u_a) = 0.6$ MPa. Trayectoria ABCDEFG, ensayo ISO-2 (Mini-célula isótropa).

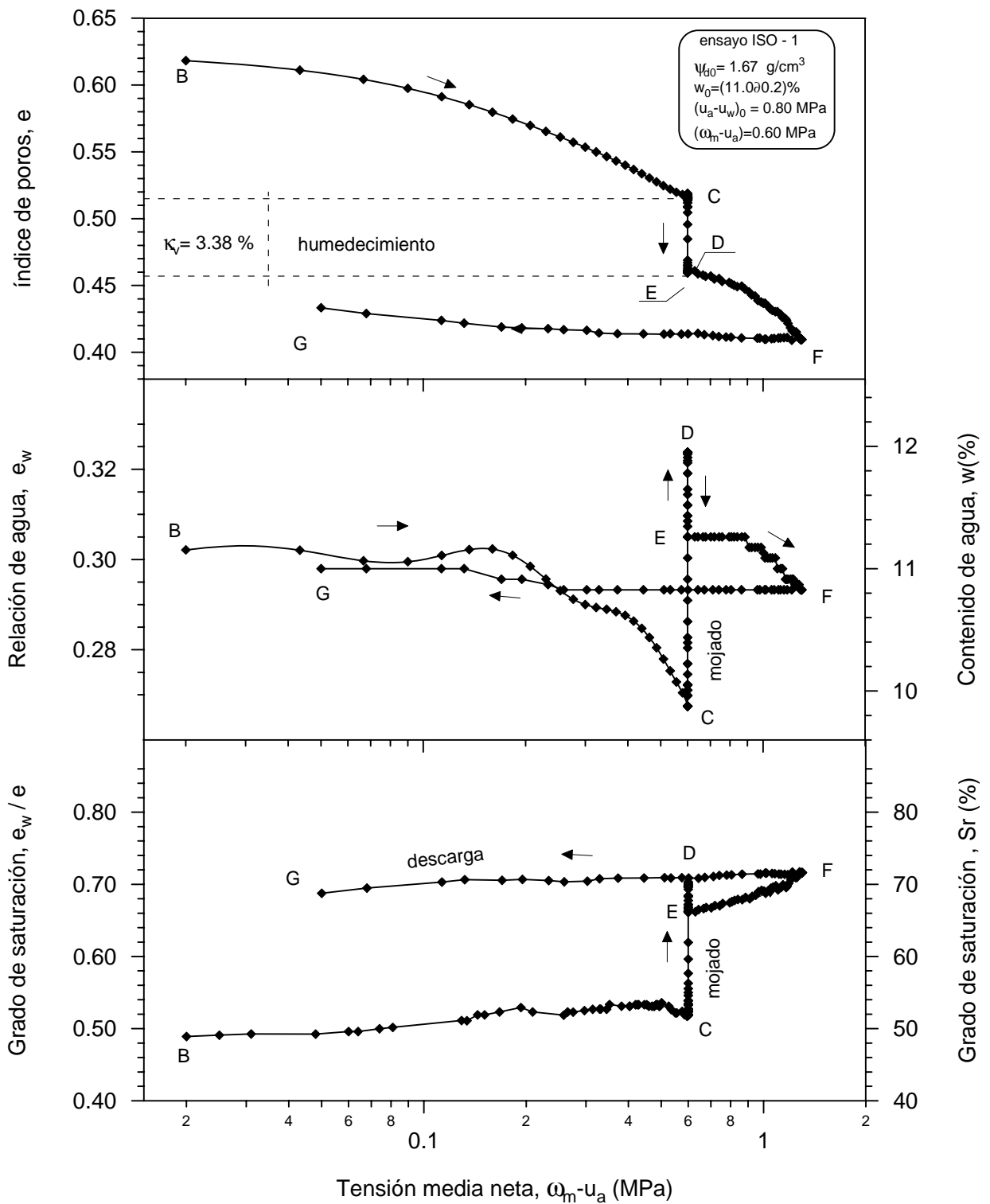


Figura 6.44a Variación del índice de e , e_w y e_w/e en las trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga. Trayectoria BCDEFG, ensayo ISO-1 (Mini-célula isotropa).

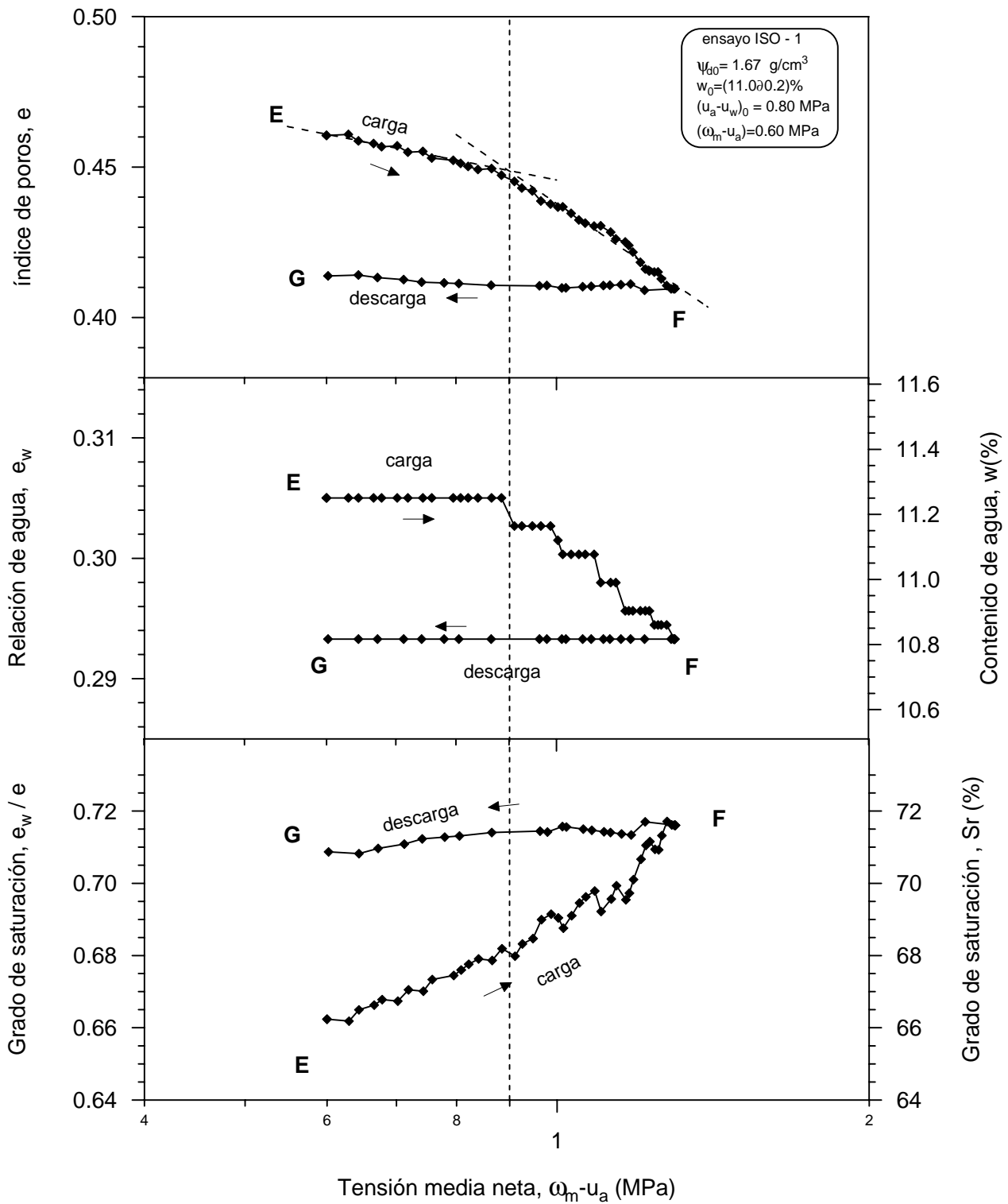


Figura 6.44b Variación de e , e_w y e_w/e durante el ciclo de carga-descarga. Trayectoria EFG, ensayo ISO-1 (Mini-célula isotrópica).

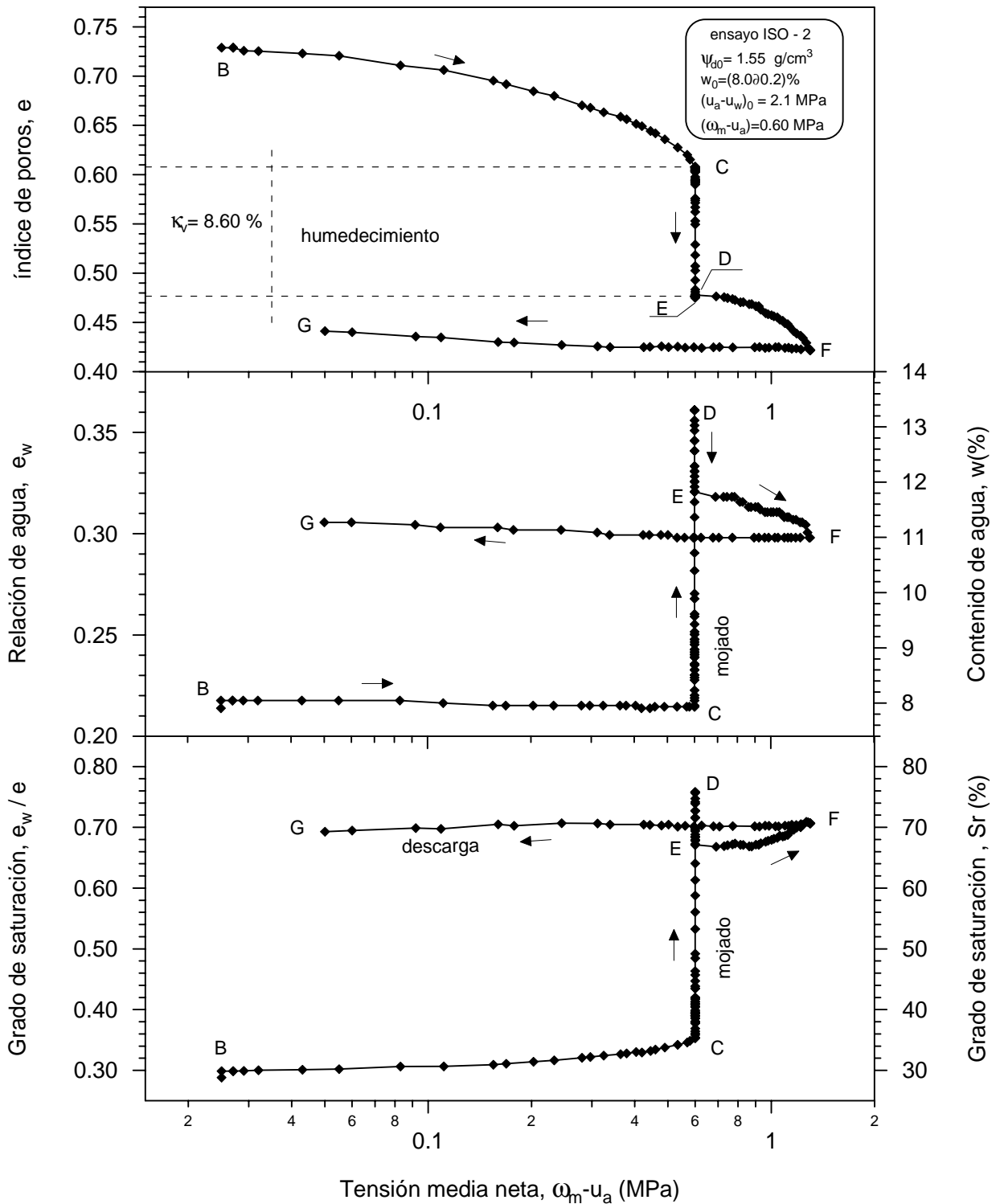


Figura 6.45a Variación del índice de e , e_w y e_w/e en las trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga. Trayectoria BCDEFG, ensayo ISO-2 (Mini-célula isótropa).

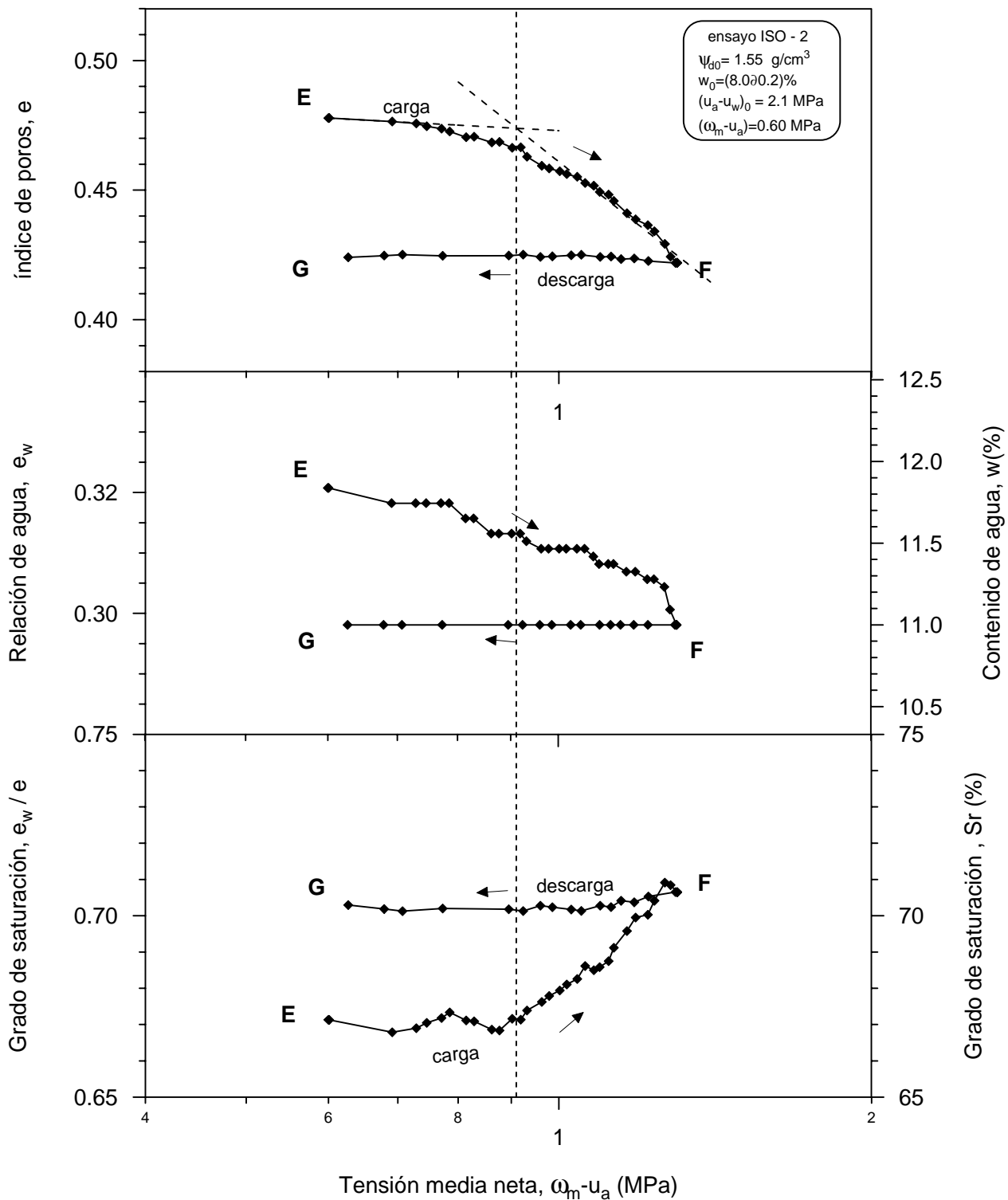


Figura 6.45b Variación de e , e_w y e_w/e durante el ciclo de carga-descarga. Trayectoria EFG, ensayo ISO-2 (Mini-célula isótropa).

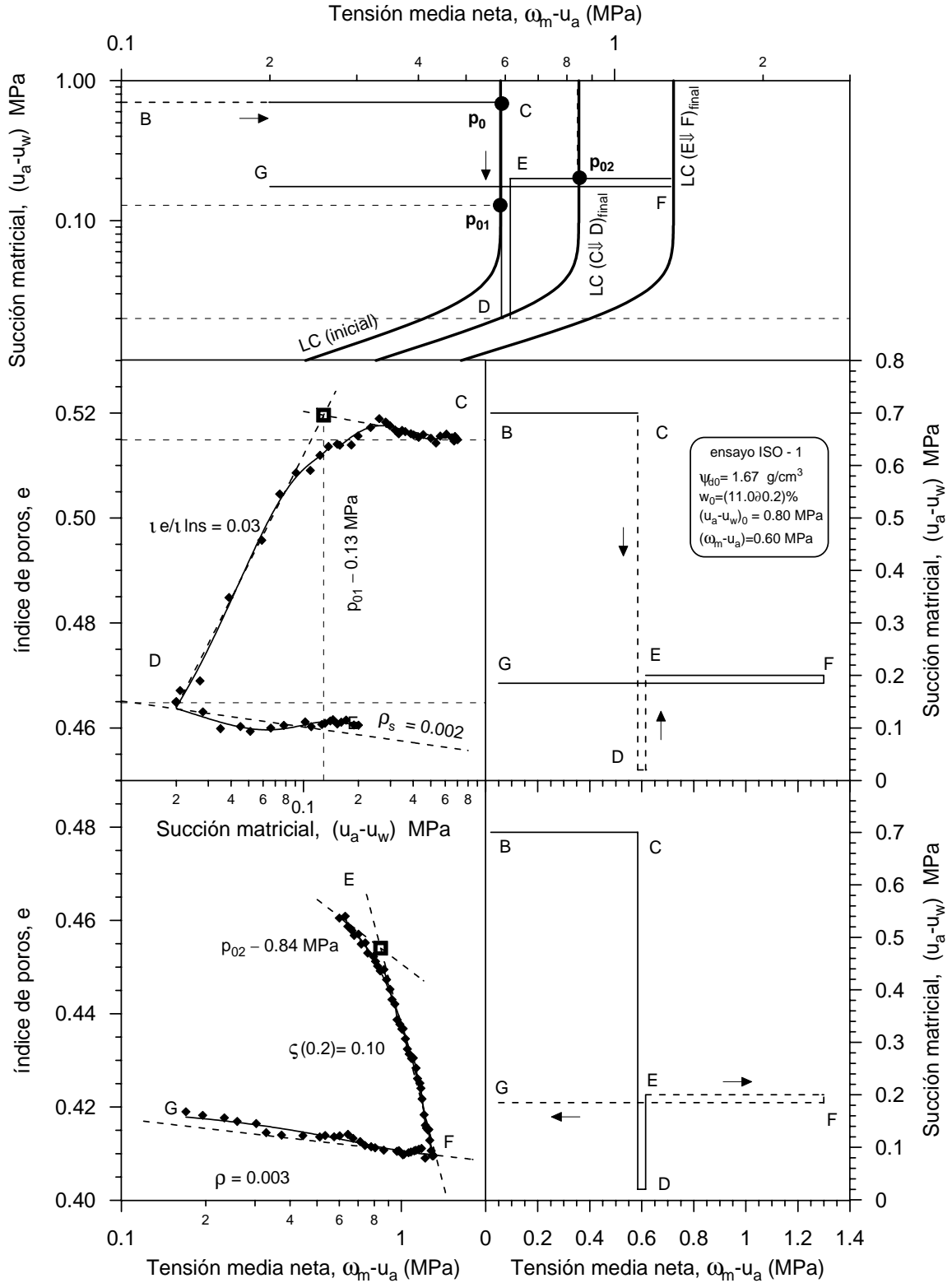


Figura 6.46 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_m - u_a)$, ensayo ISO-1.

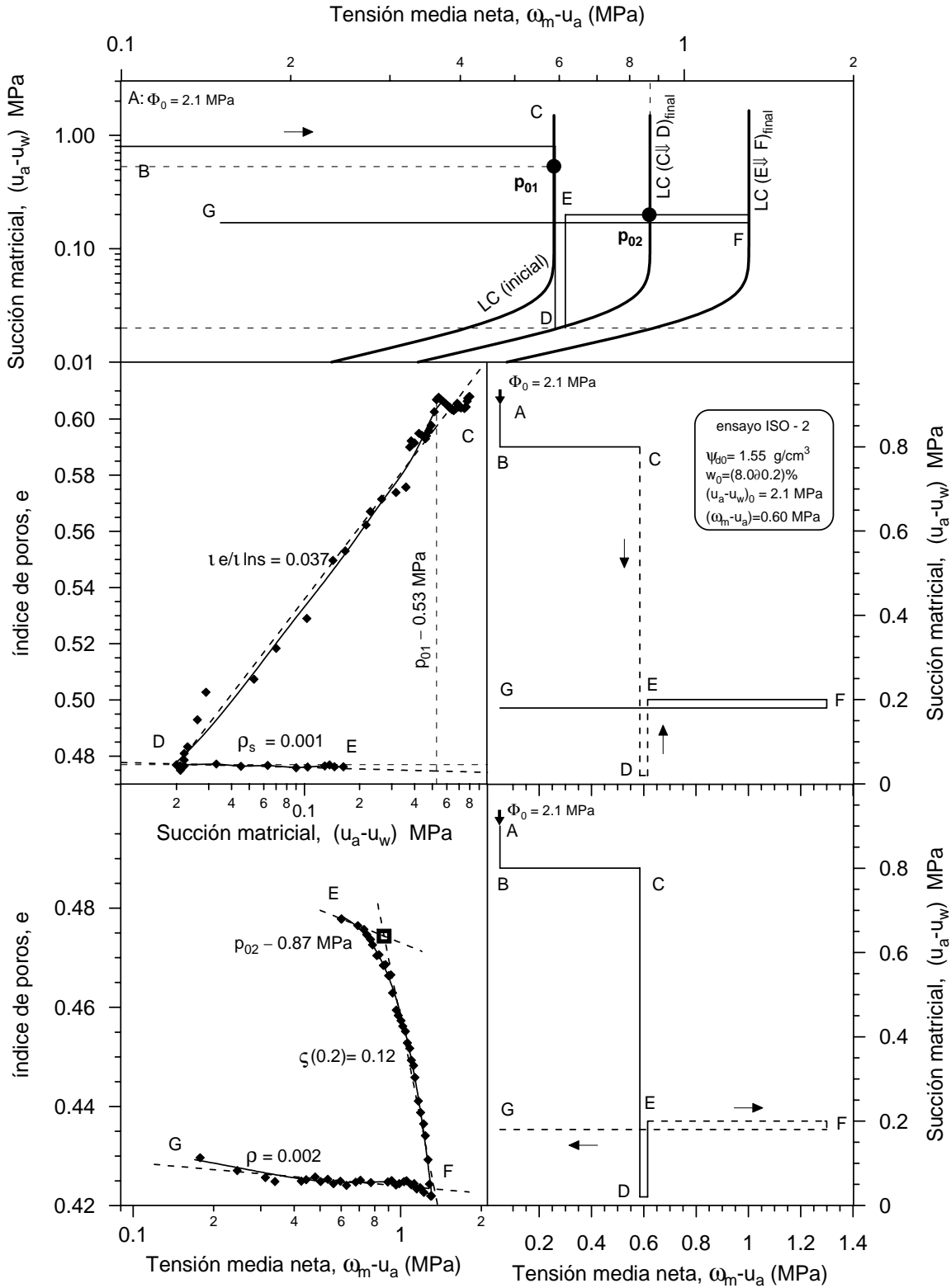


Figura 6.47 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio $(u_a - u_w, \omega_m - u_a)$, ensayo ISO-2.

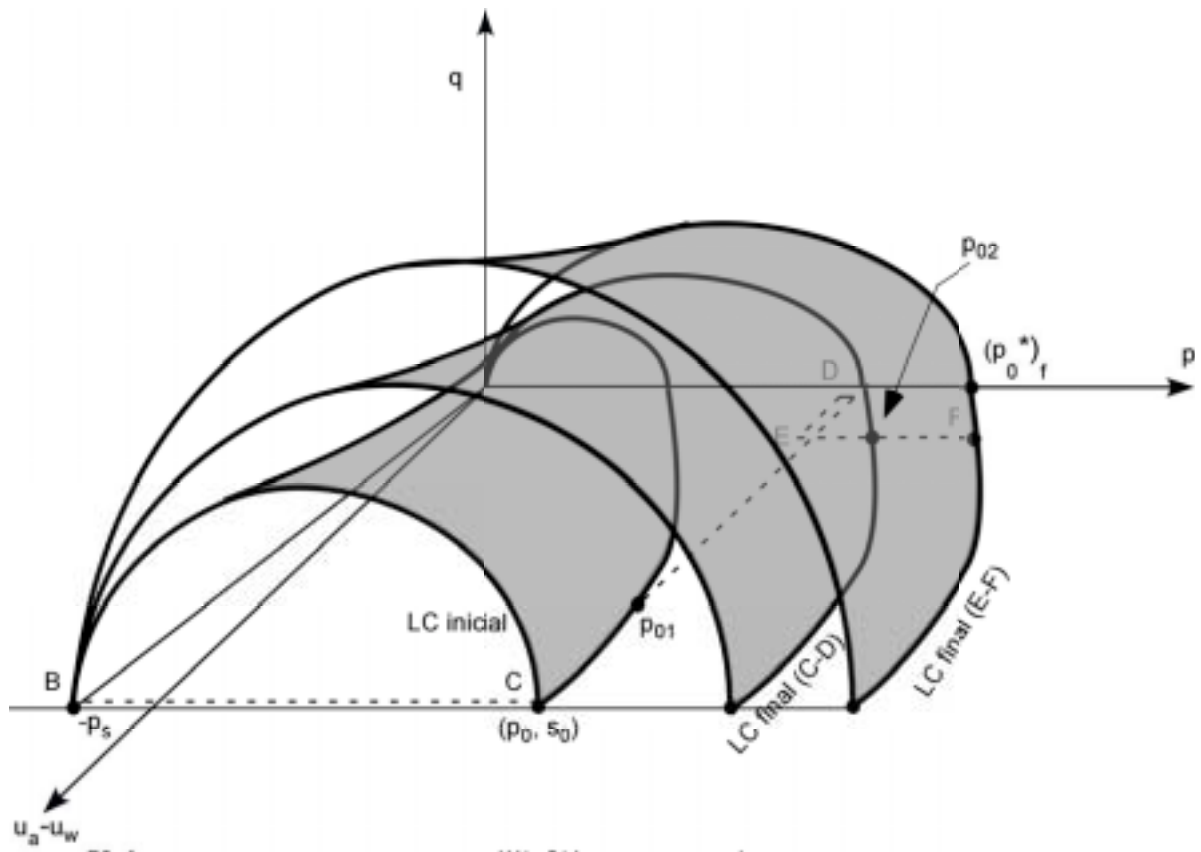


Figura 6.48 Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de esfuerzos (p, q, s) . Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia (LC) para los ensayos isótropos ISO-1 y ISO-2.

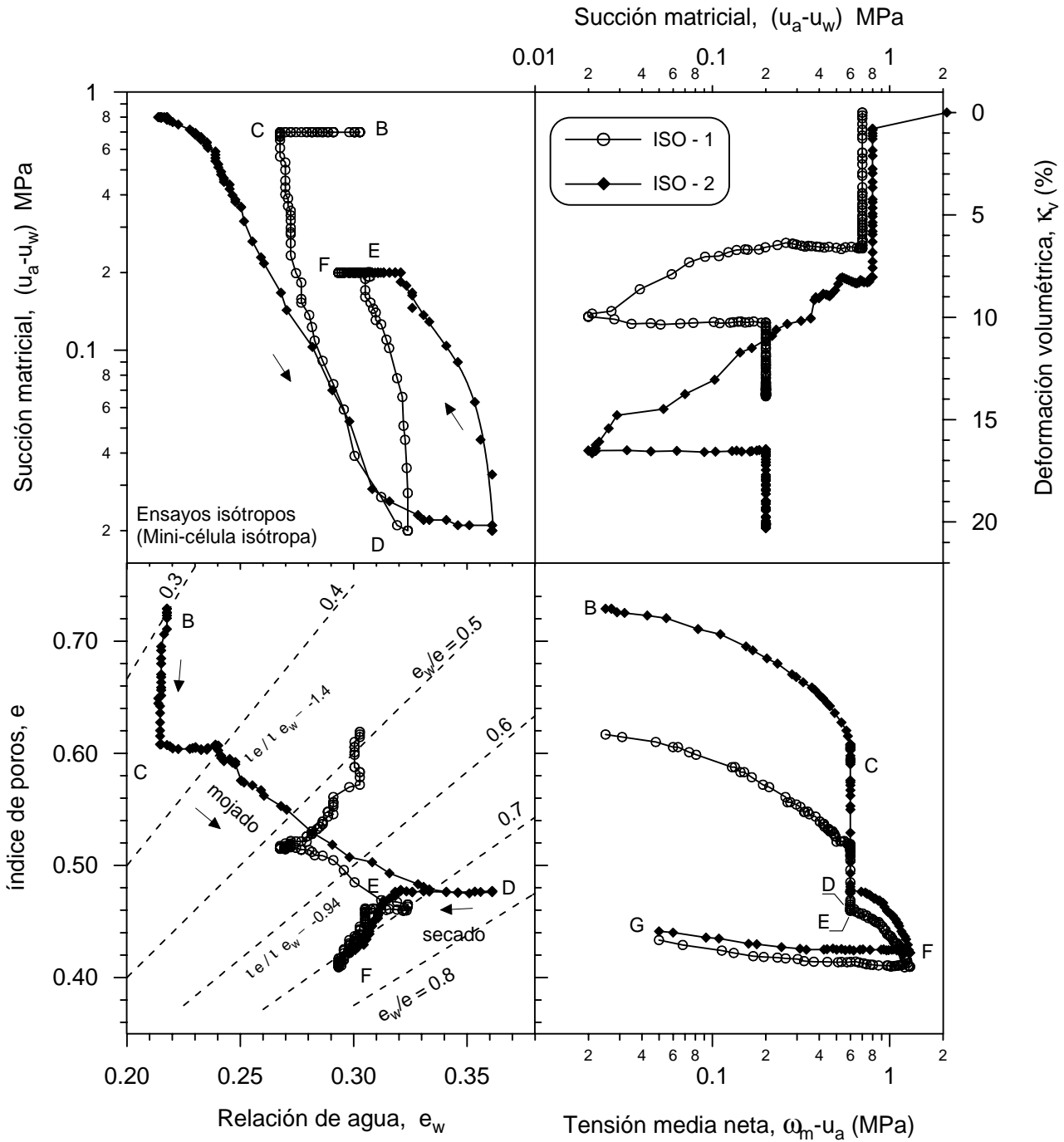


Figura 6.49 Resultados isotrópicos ISO-1 y ISO-2, en el plano $\kappa_v : s : e_w : e : \omega_m - u_a$.

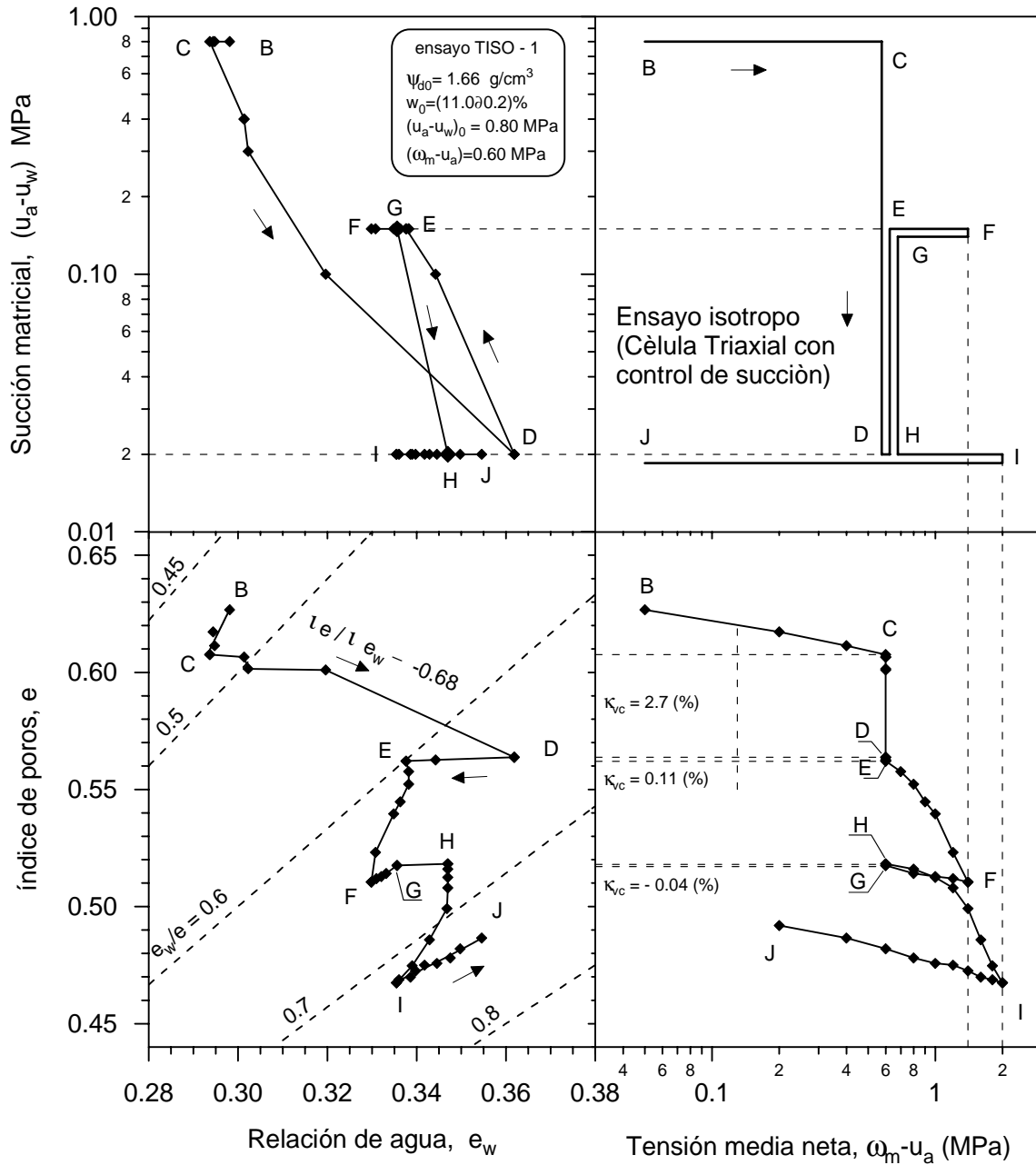


Figura 6.50 Resultados isotrópicos obtenidos con la célula triaxial, representados en el plano s : $(\omega_m - u_a)$: e_w : e . Trayectorias de humedecimiento-secado, y carga-descarga. Ensayo TISO-1.

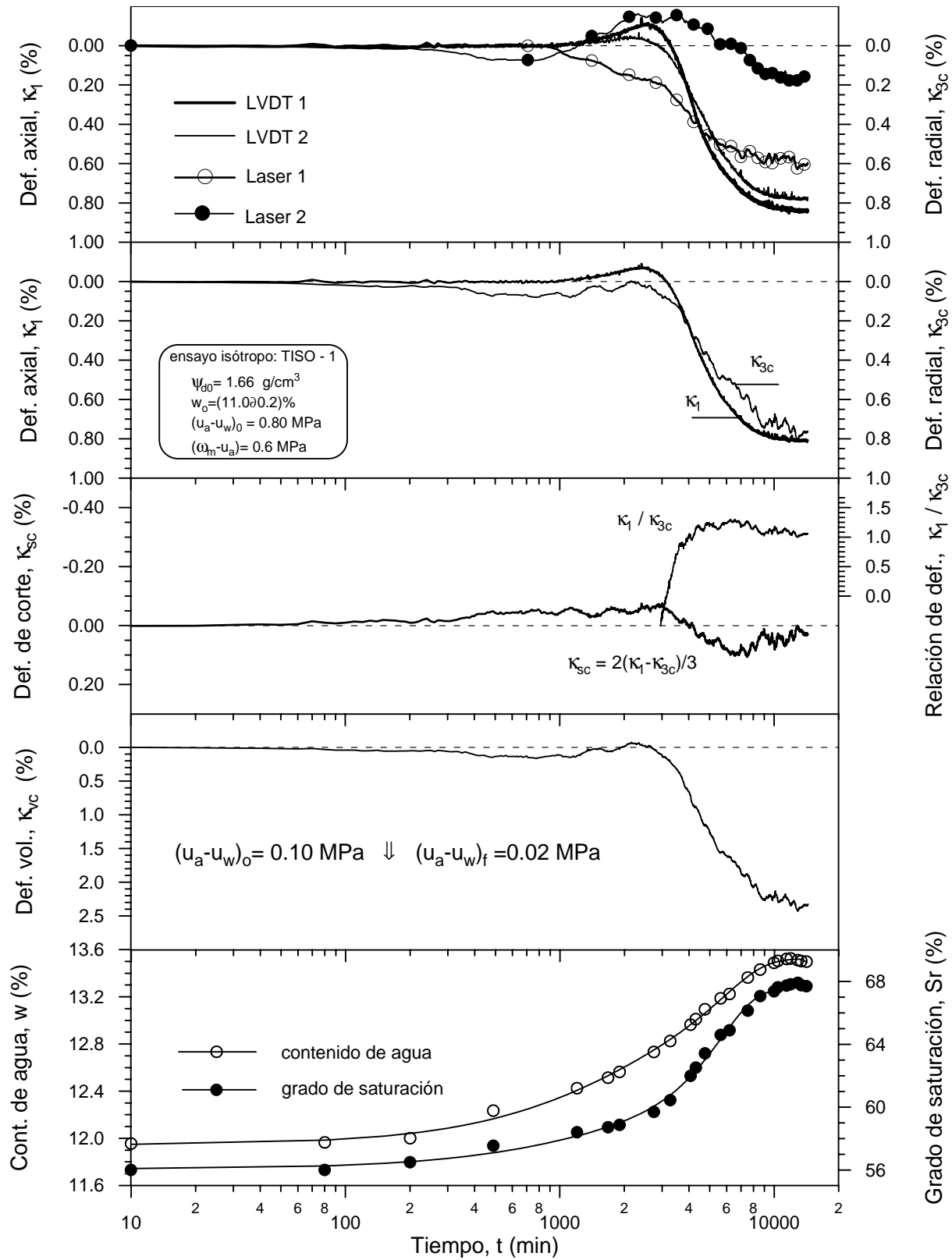


Figura 6.51 Evolución en el tiempo, de las deformaciones, contenidos de agua, y grados de saturación en una etapa de humedecimiento: $(u_a - u_w)_0 = 0.10 \text{ MPa} \Downarrow (u_a - u_w)_f = 0.02 \text{ MPa}$. Ensayo TISO-1.

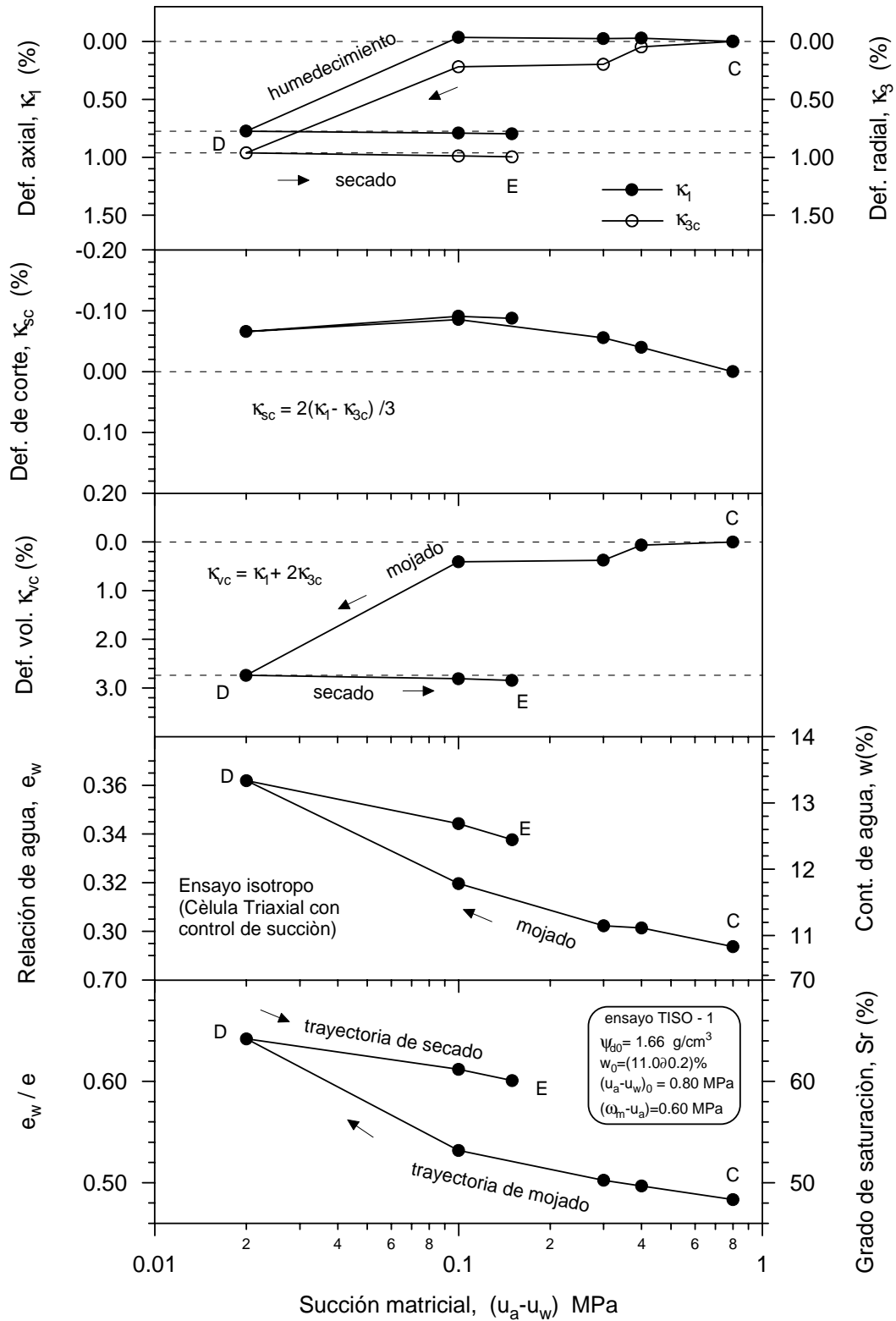


Figura 6.52 Variación de la deformación axial, radial, de corte y volumétrica, y cambios en contenidos de agua y grados de saturación en un ciclo de humedecimiento-secado, bajo tensión media constante $(\omega_m - u_a) = 0.6 \text{ MPa}$. Ensayo TISO-1.

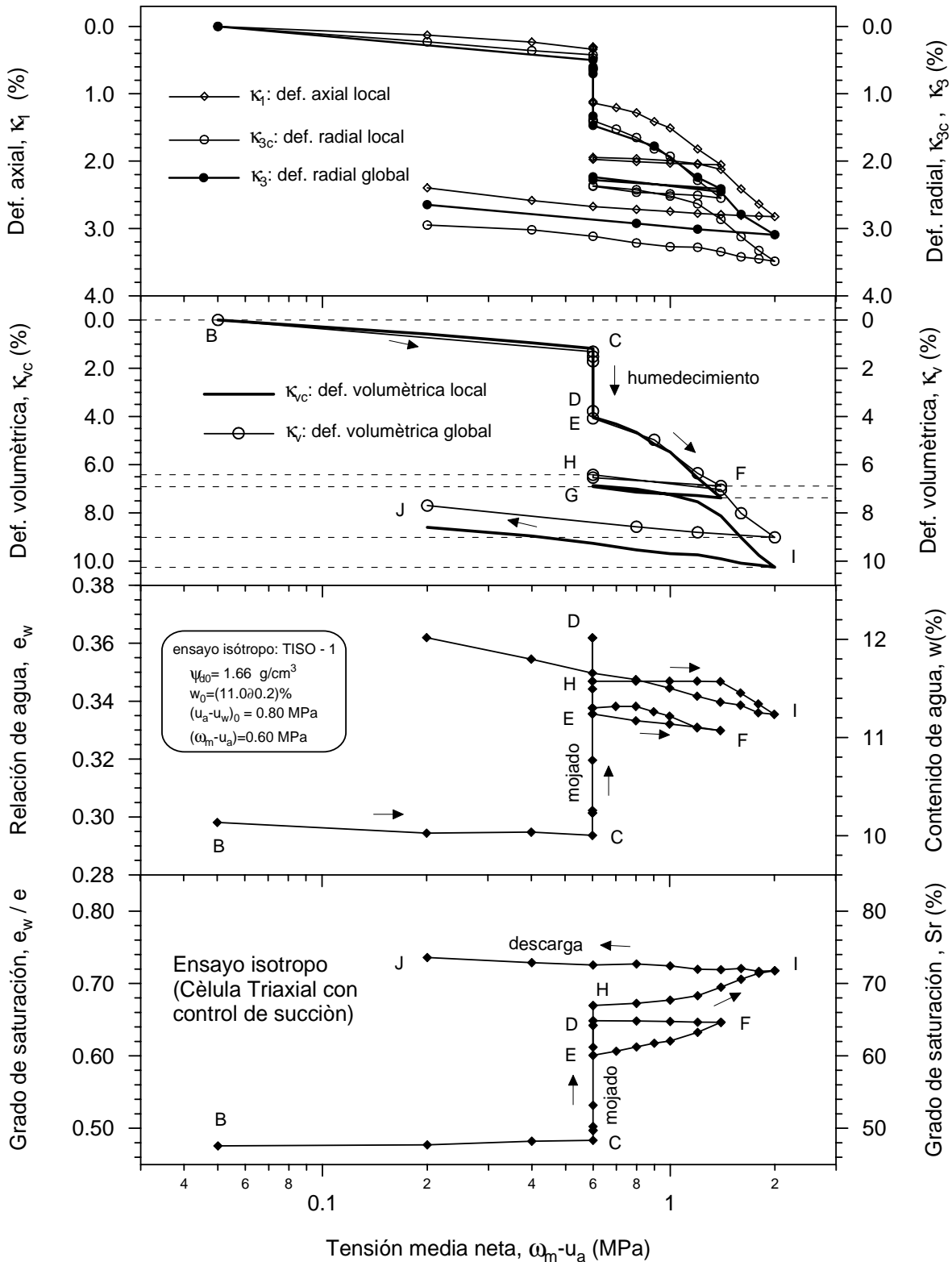


Figura 6.53a Variación de la deformación axial, radial (local y global), volumétrica (local y global), contenidos de agua y grados de saturación en trayectorias de humedecimiento-secado y carga-descarga. Ensayo TISO-1 (célula triaxial).

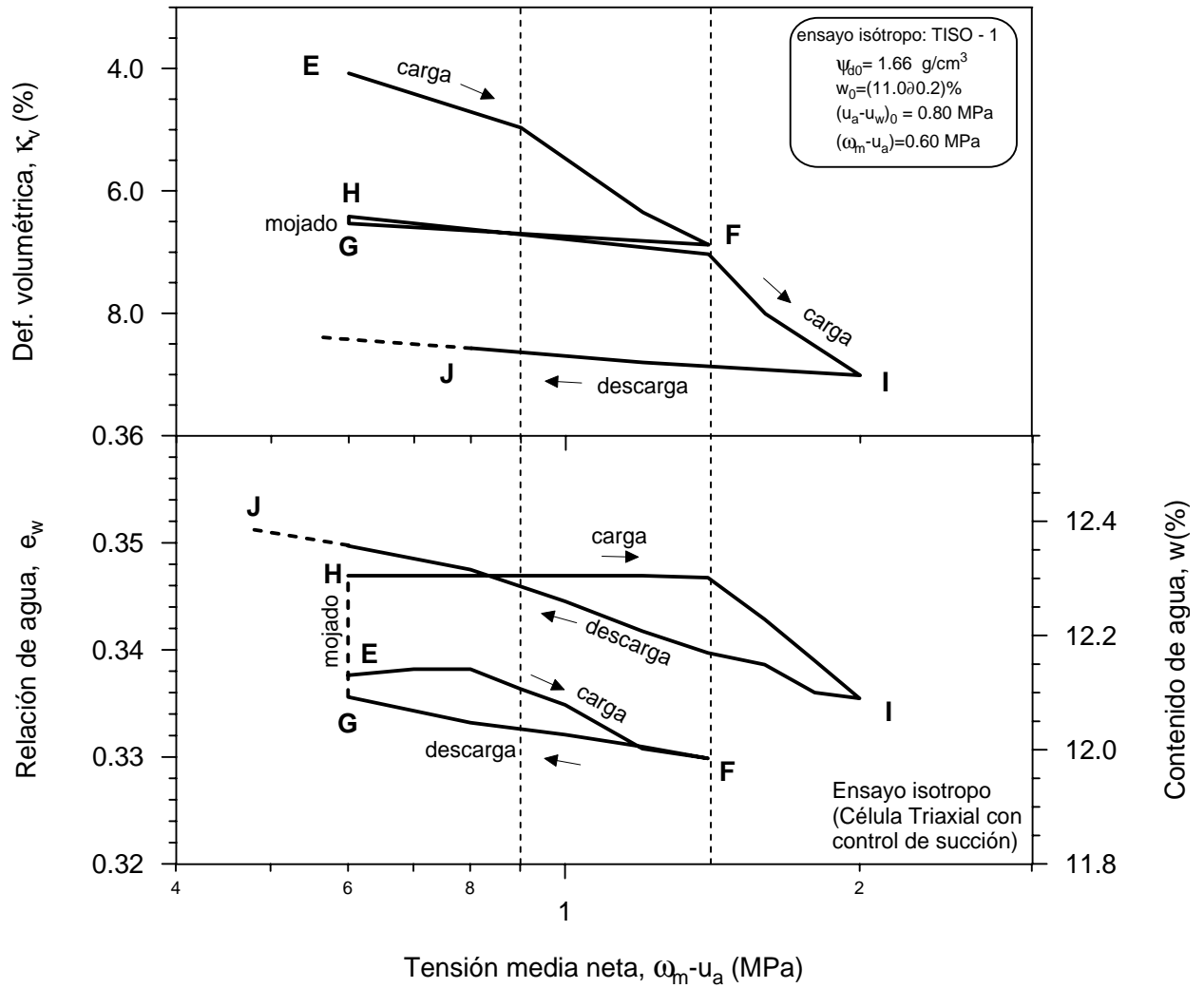


Figura 6.53b Variación de la deformación volumétrica y la relación de agua durante los ciclos de carga–descarga. Trayectorias EFG y HIJ, ensayo TISO-1 (célula triaxial).

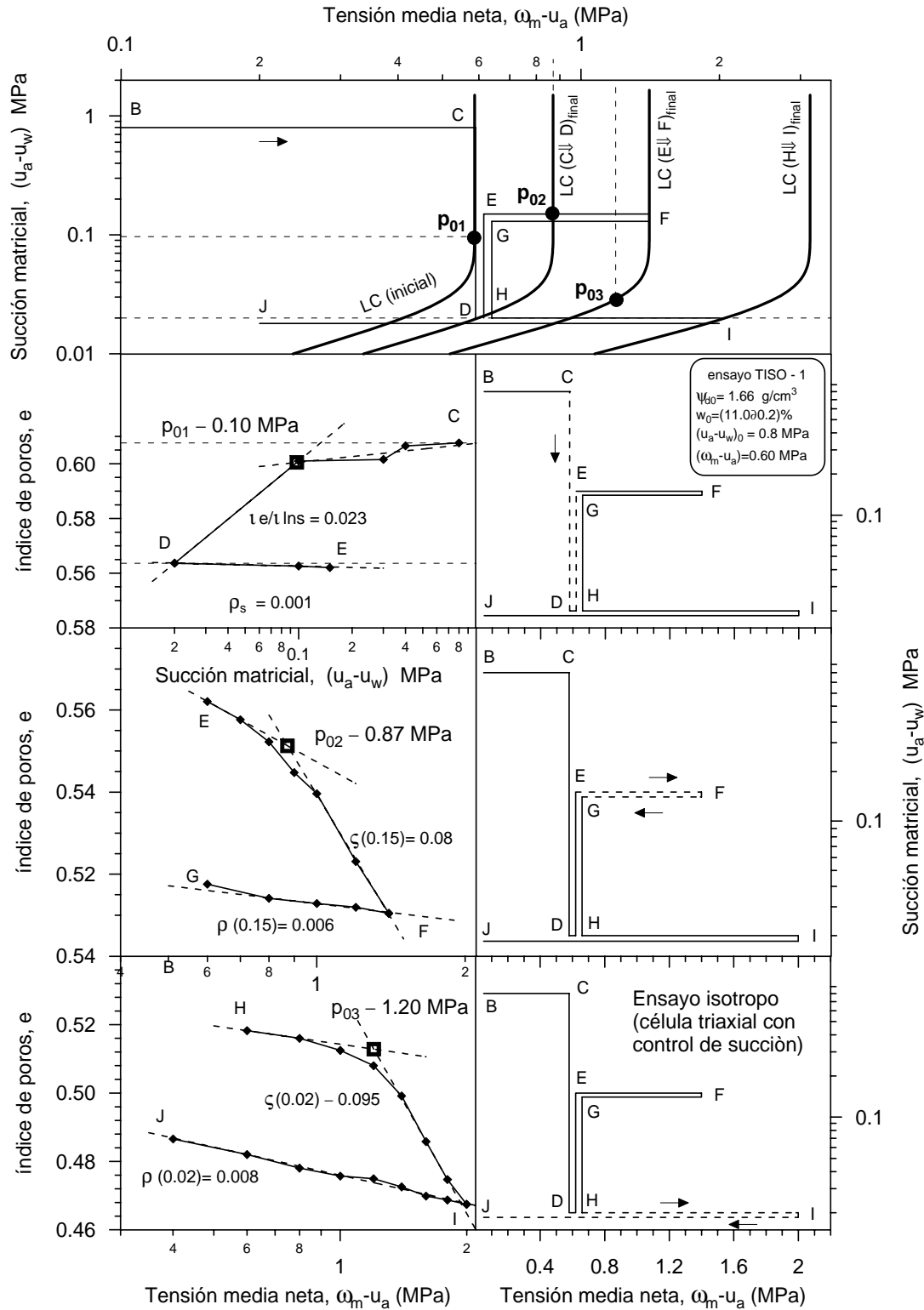


Figura 6.54 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w, ω_m-u_a) , ensayo TISO-1.

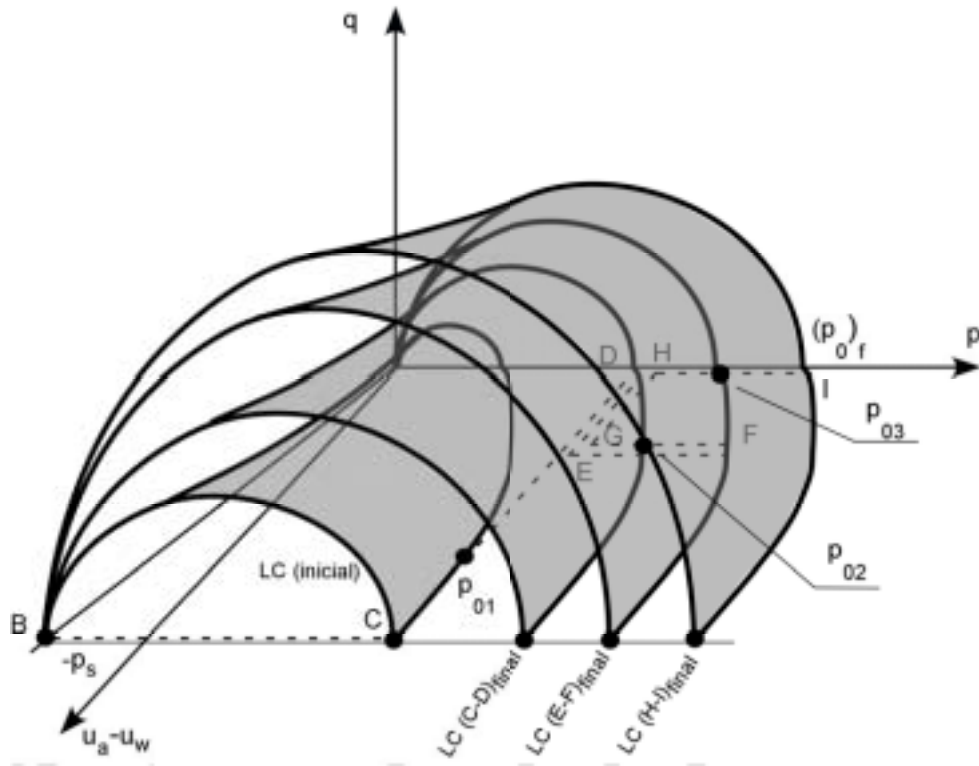


Figura 6.55 Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de los esfuerzos (p , q , s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia (LC) para el ensayo isotrópico TISO-1.

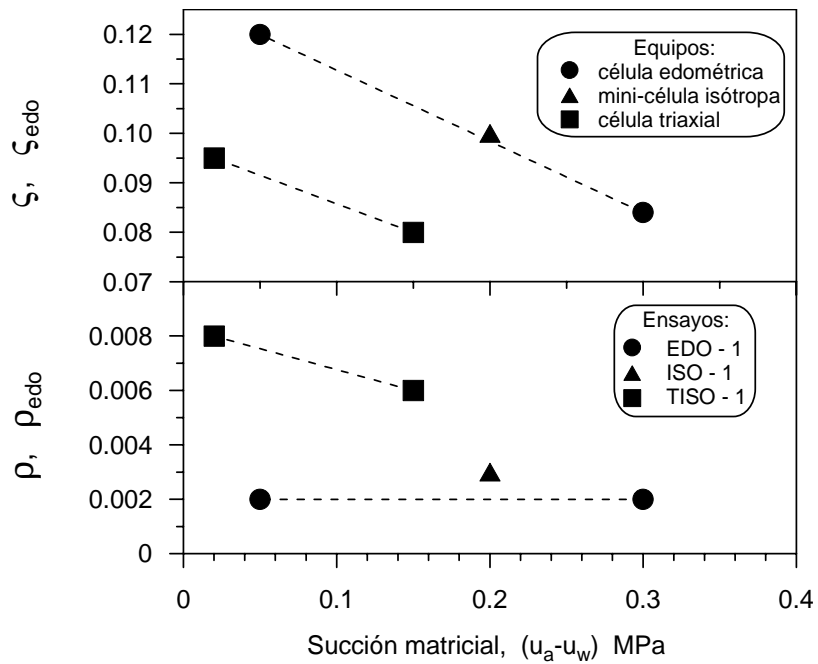


Figura 6.56 Valores de ζ , ζ_{edo} , ρ , y ρ_{edo} a diferente succión matricial, de los ensayos isotrópicos y edométricos en trayectorias de carga y descarga.

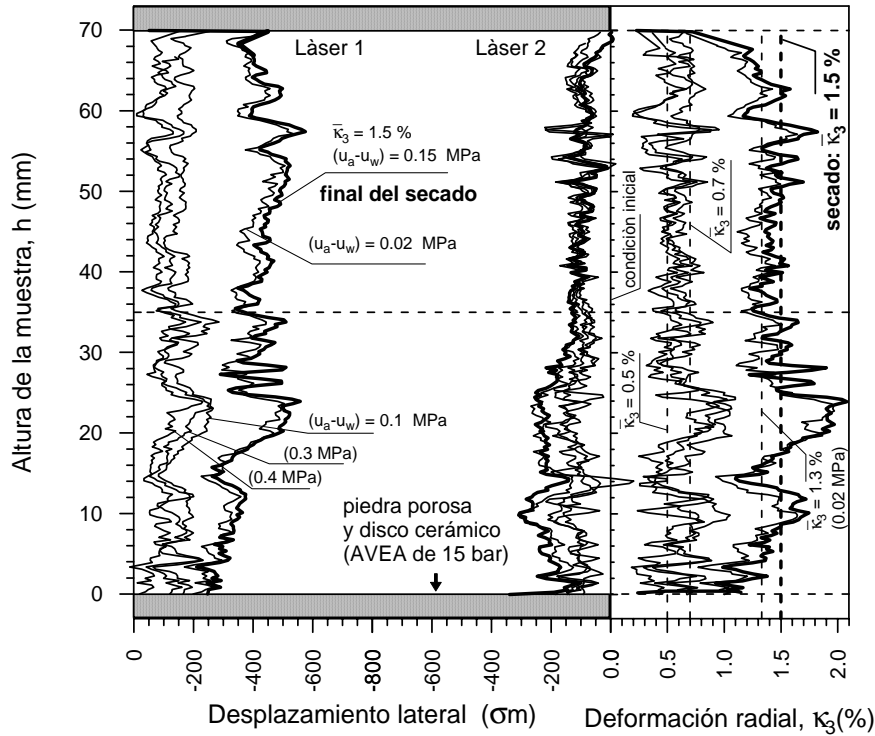


Figura 6.57 Perfiles de las deformaciones laterales en las etapas de humedecimiento y secado, bajo esfuerzo medio constante $(\omega_m - u_a) = 0.06$ MPa. Trayectoria BCDE, TISO-1.

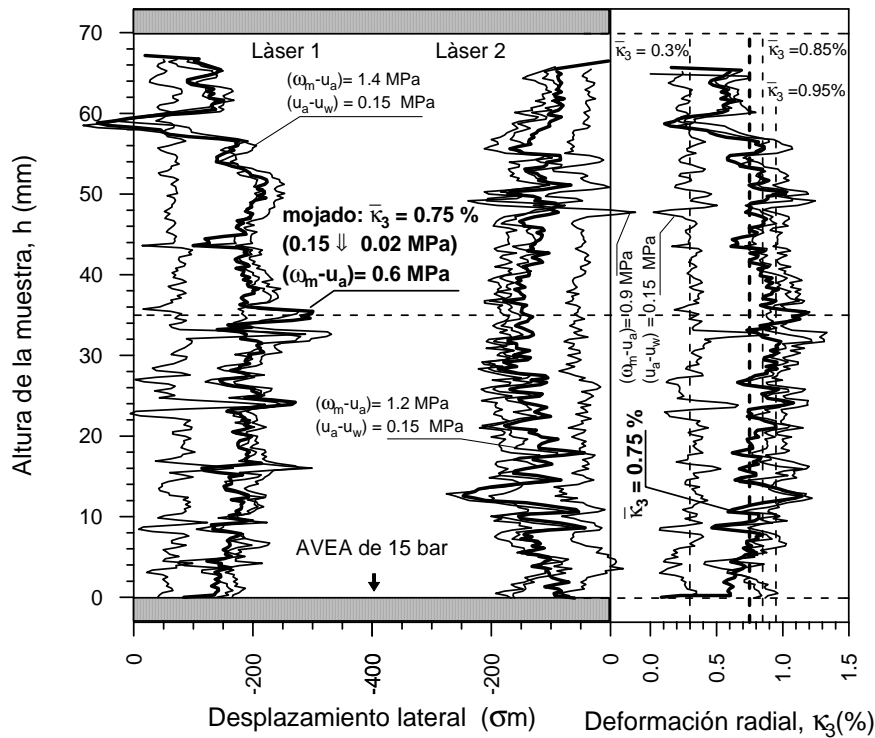


Figura 6.58 Perfiles de las deformaciones laterales del primer ciclo de carga–descarga a succión constante $(u_a - u_w) = 0.15$ MPa. Trayectoria EFG, TISO-1.

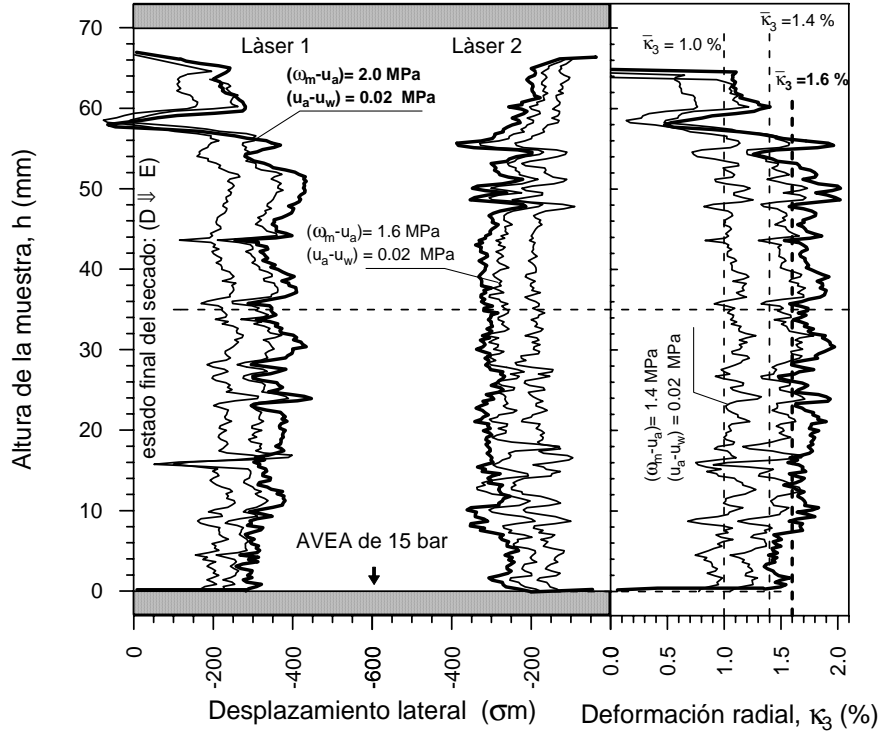


Figura 6.59 Perfiles de las deformaciones laterales de la segunda etapa de carga, bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.02$ MPa). Trayectoria H-I, TISO-1.

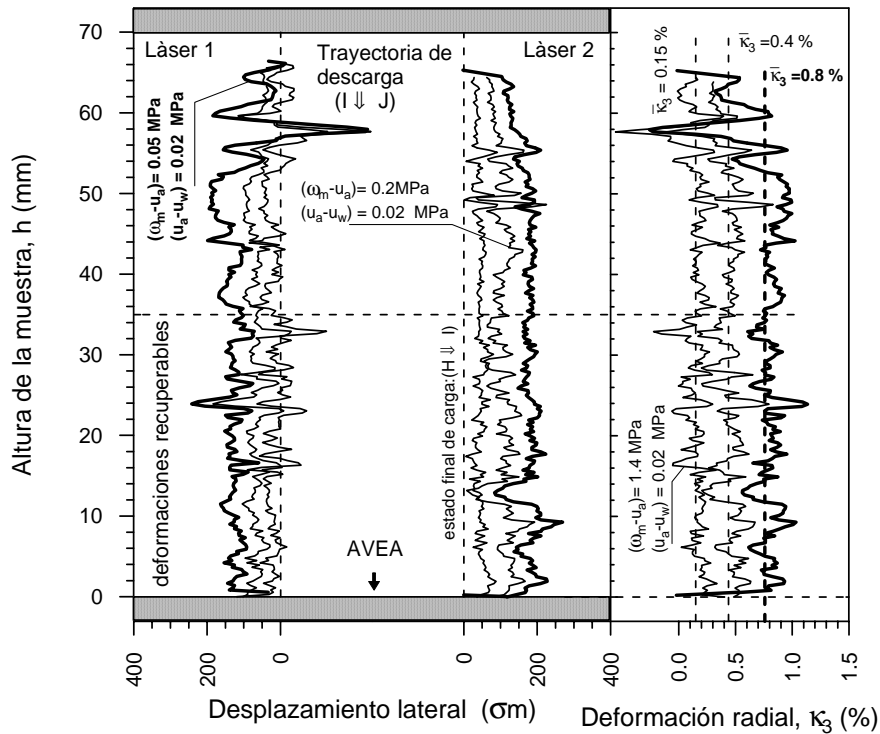


Figura 6.60 Perfiles de las deformaciones laterales recuperables de la descarga final del ensayo, bajo succión constante ($u_a - u_w = 0.02$ MPa). Trayectoria I-J, TISO-1.

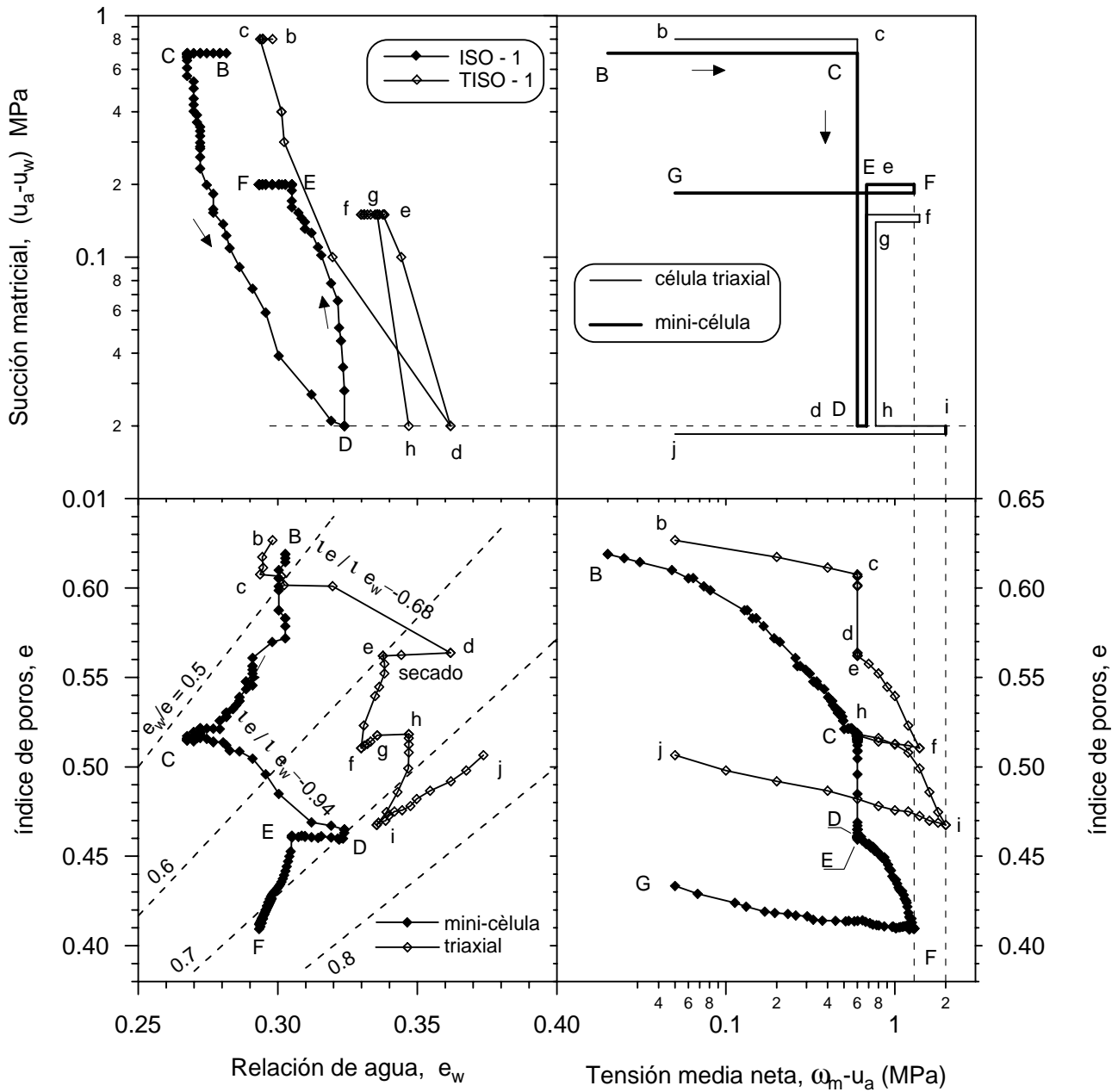


Figura 6.61 Resultados isotrópicos obtenidos con la mini-célula y la célula triaxial, representados en el plano $s : (u_n - u_a) : e_w : e$. Ensayos ISO-1 y TISO-1.

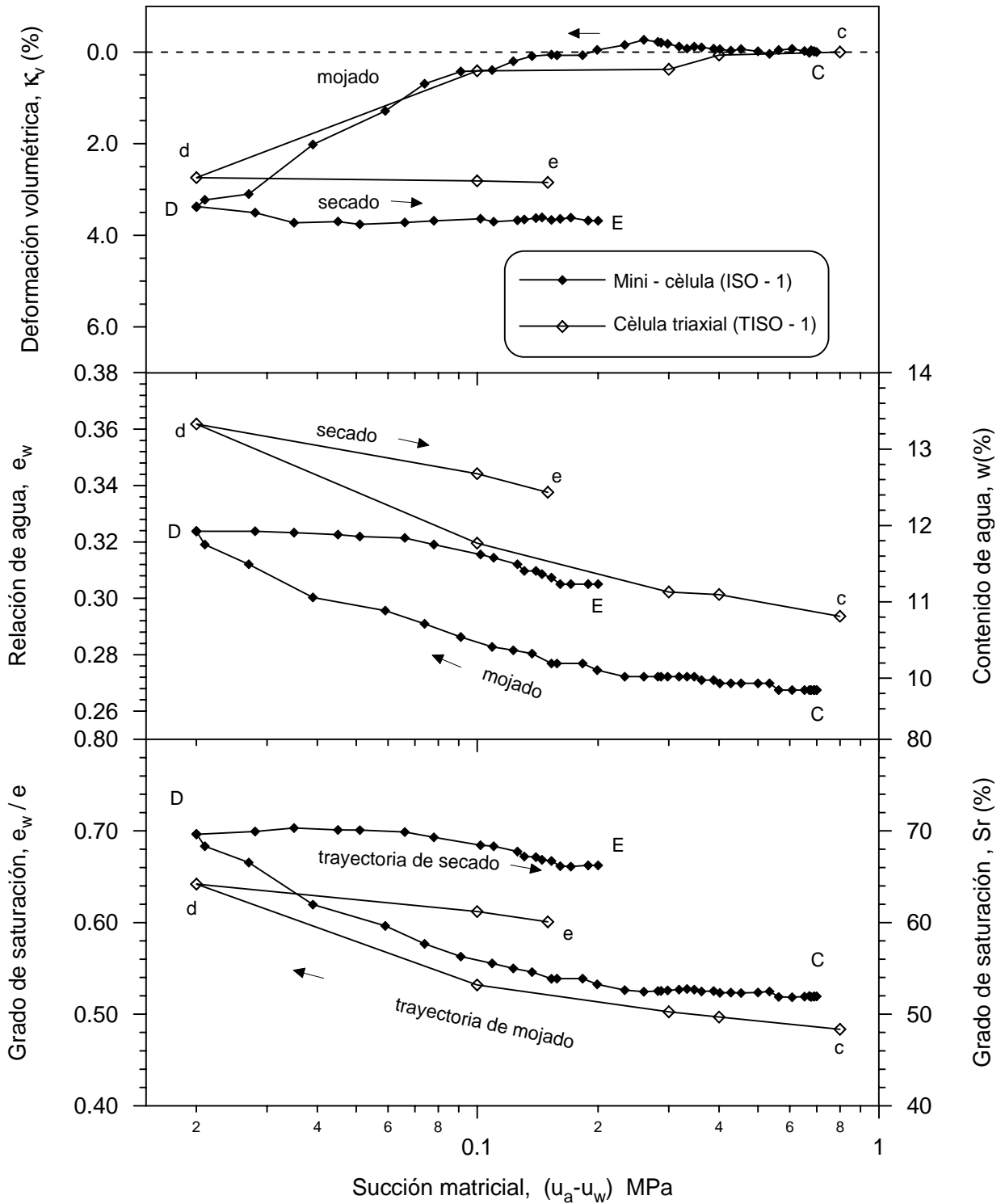


Figura 6.62 Variación de la deformación volumétrica, y cambios en contenidos de agua y grados de saturación en un ciclo de humedecimiento-secado, bajo esfuerzo medio constante ($\omega_m - u_a = 0.6$ MPa). Ensayos ISO-1 y TISO-1.

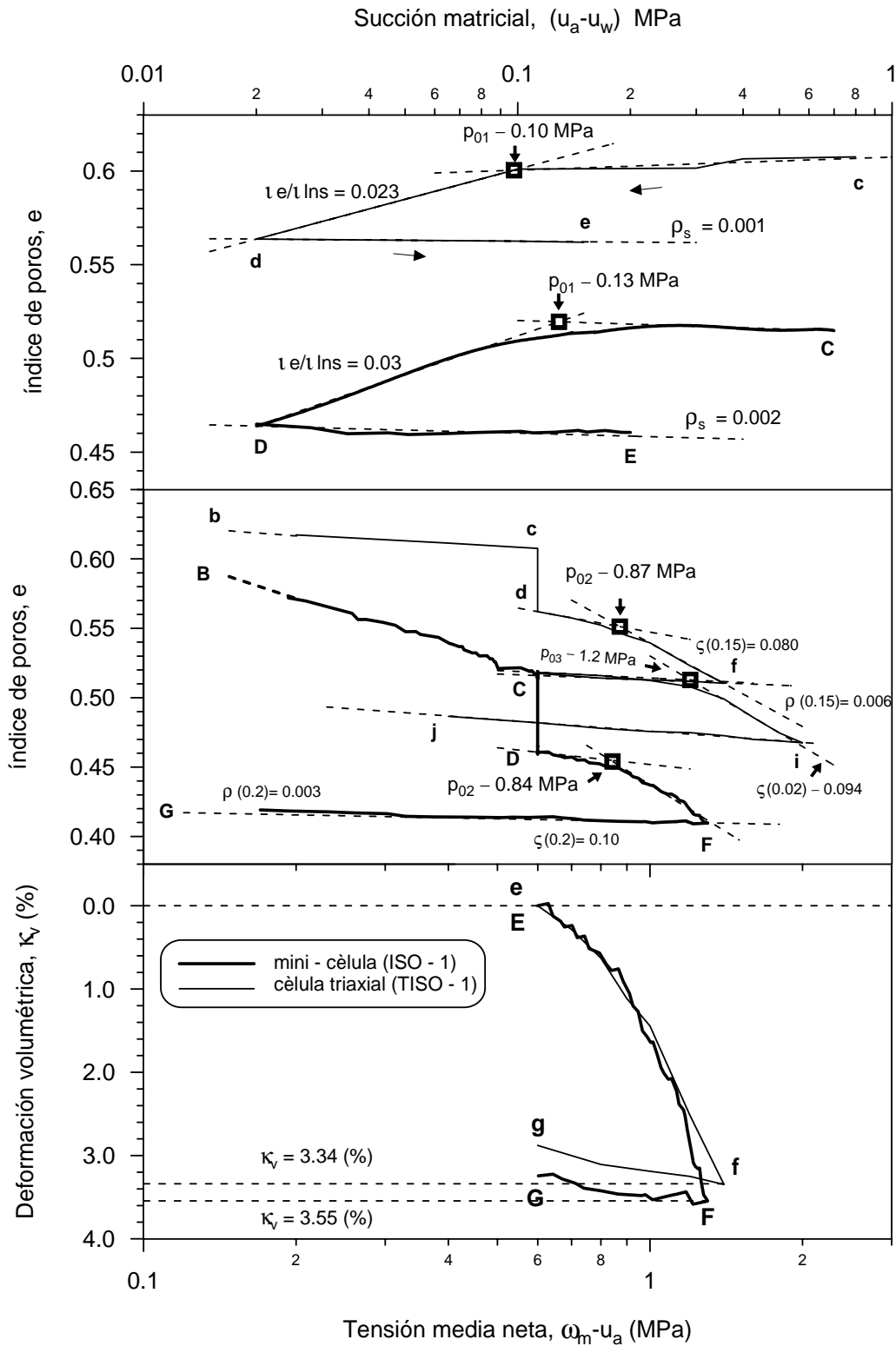


Figura 6.63 Representación gráfica de la obtención de los parámetros en ciclos de carga–descarga, y humedecimiento–secado. Ensayos ISO-1 y TISO-1.

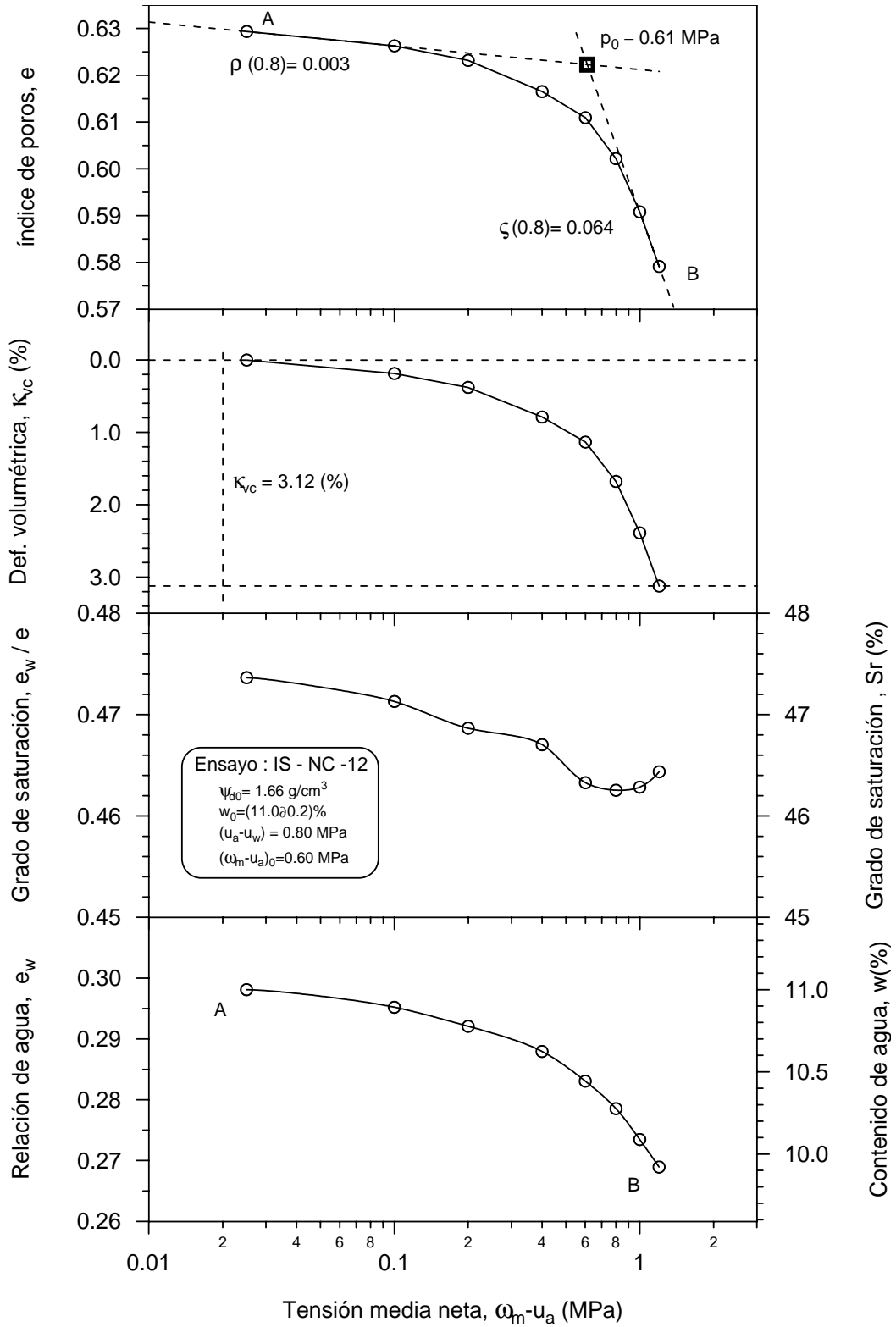


Figura 6.64 Trayectoria de carga isotrópica (A \Downarrow B) a succión constante. Ensayo de compresión triaxial IS – NC – 12.

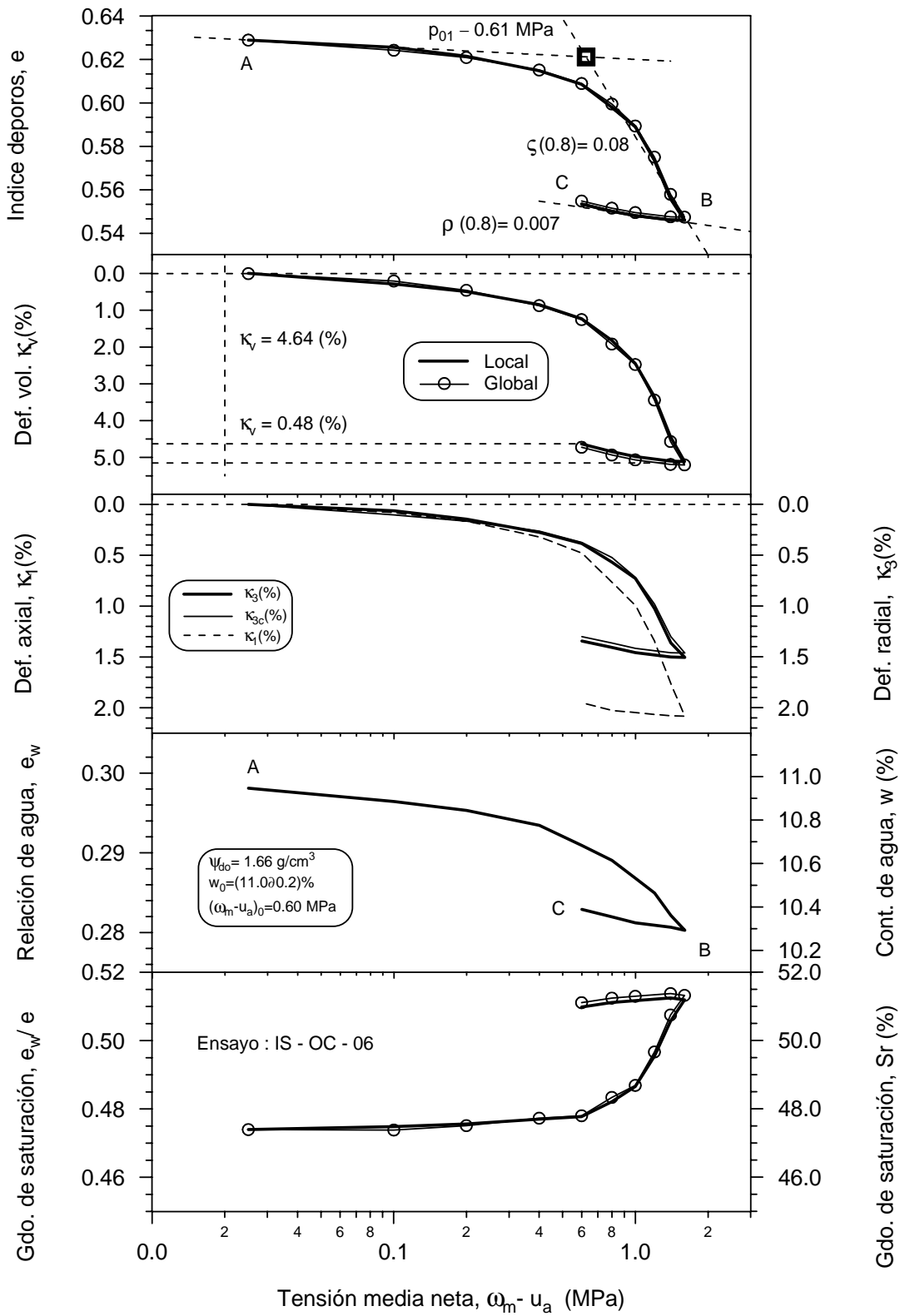


Figura 6.65 Ciclo de carga–descarga isotrópica (A↘ B↘ C) a succión constante. Ensayo de compresión triaxial IS – OC – 06.

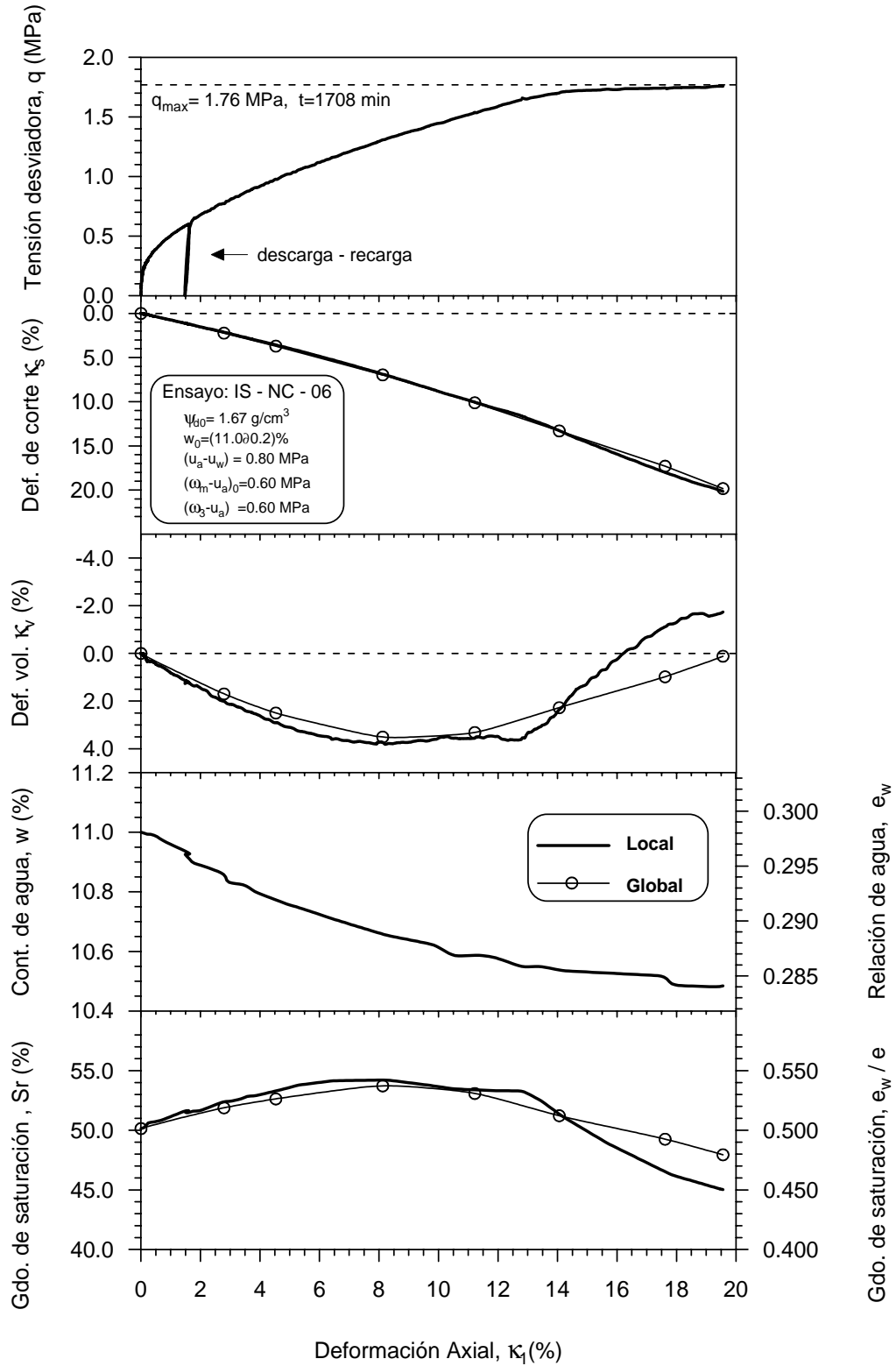


Figura 6.66 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS – NC – 06.

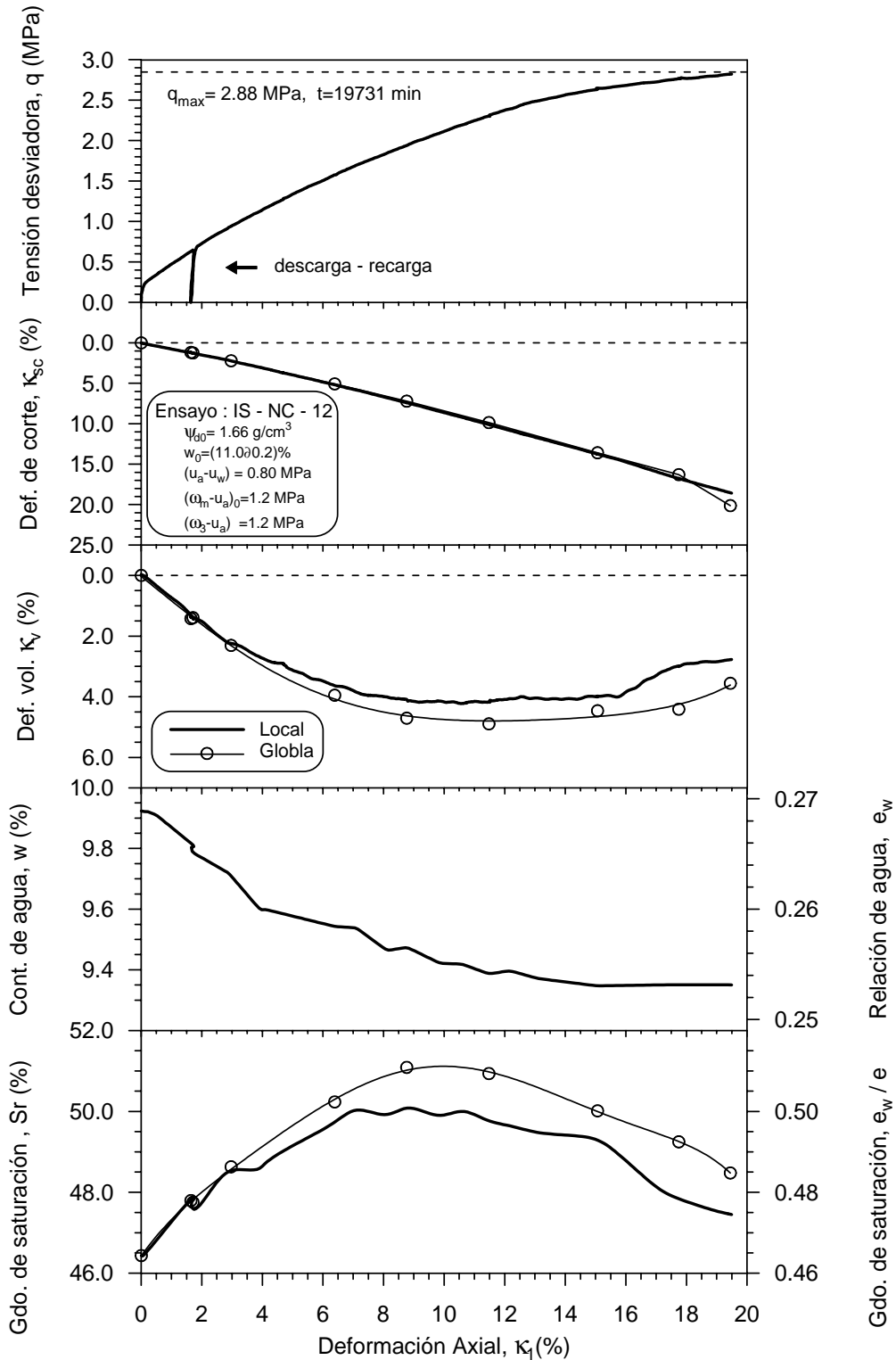


Figura 6.67 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS – NC – 12.

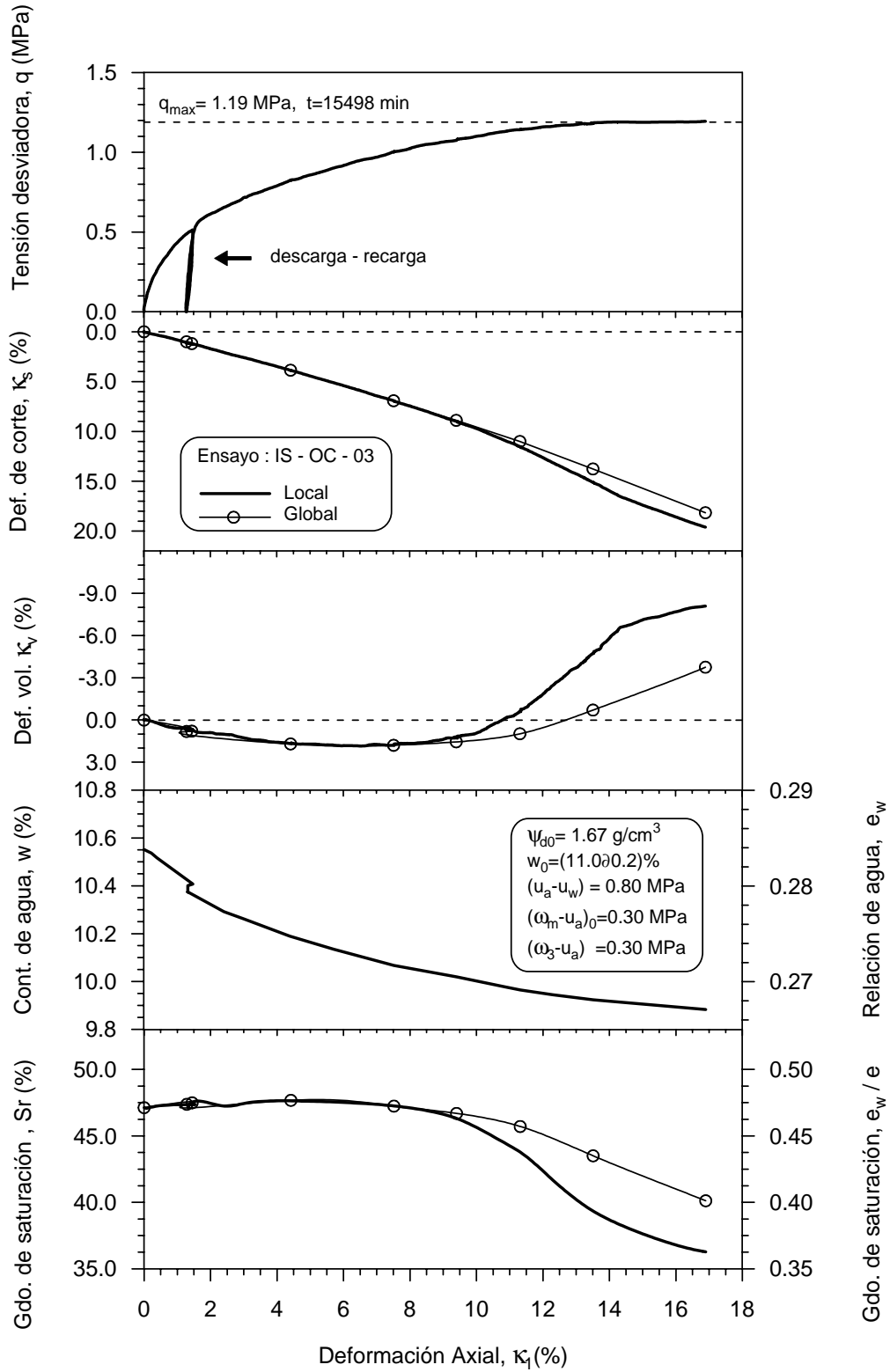


Figura 6.68 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS – OC – 03.

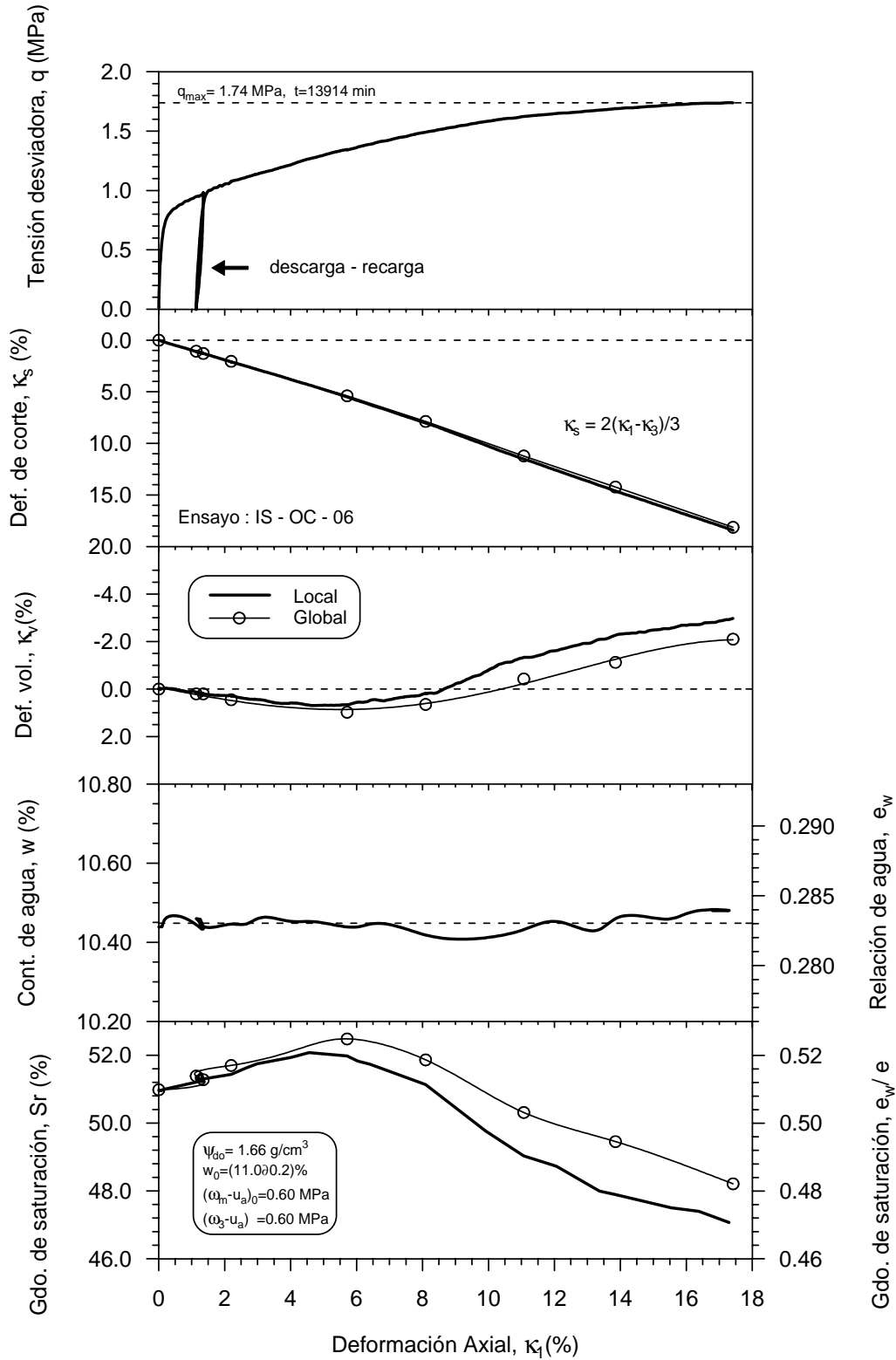


Figura 6.69 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS – OC – 06.

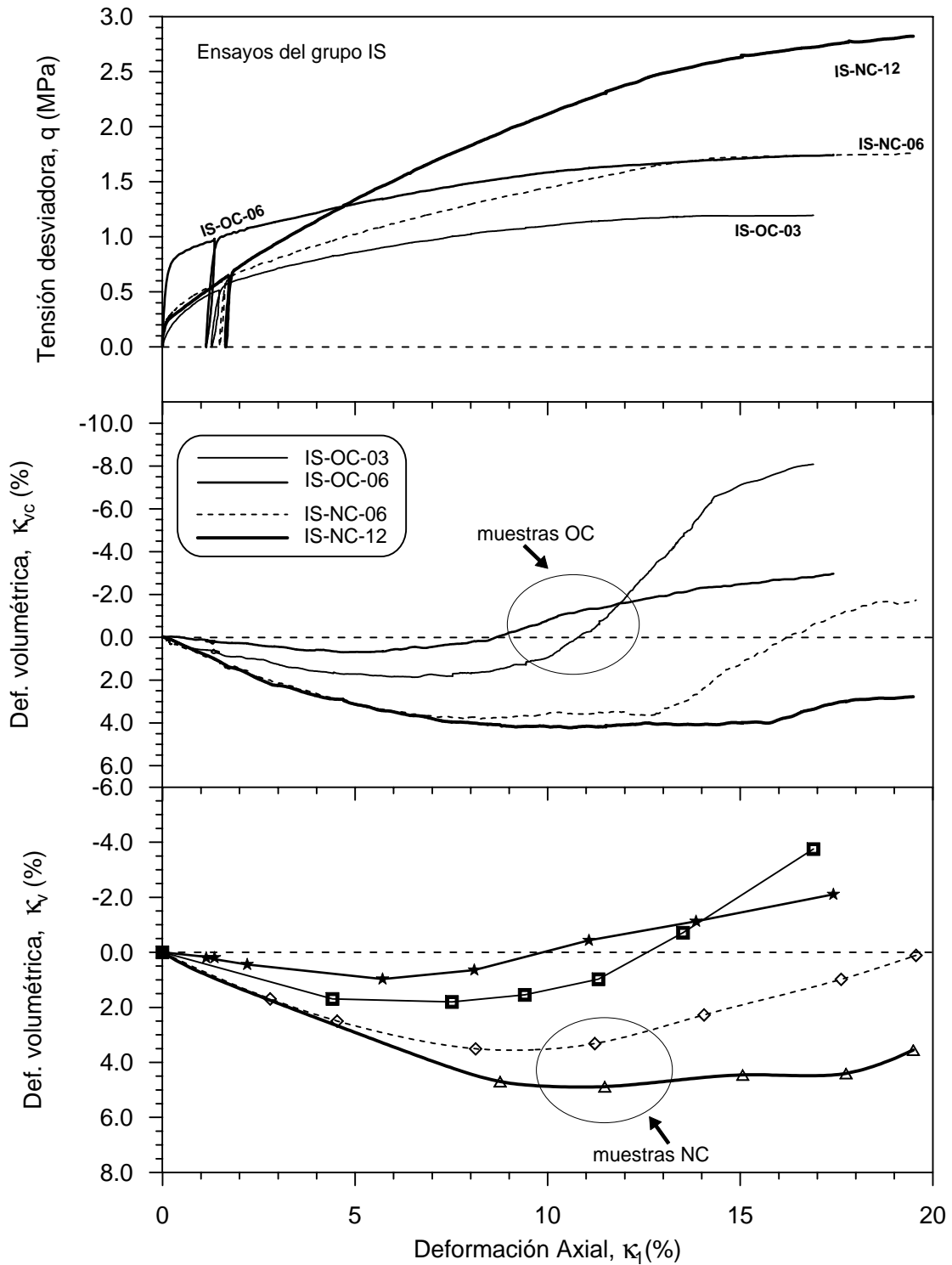


Figura 6.70 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica local y global de los ensayos del grupo IS, en muestras sobreconsolidadas, y normalmente consolidadas.

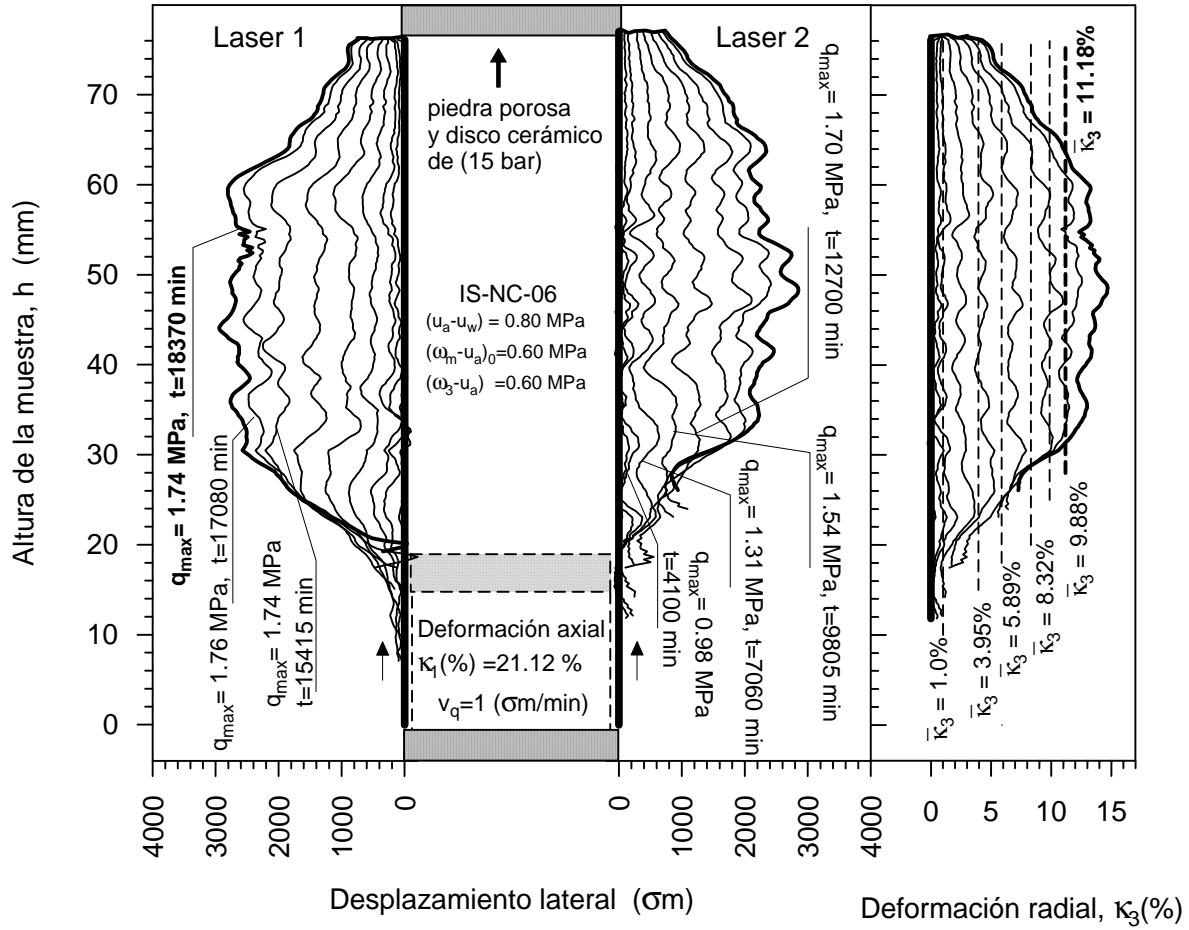


Figura 6.71 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IS – NC – 06.

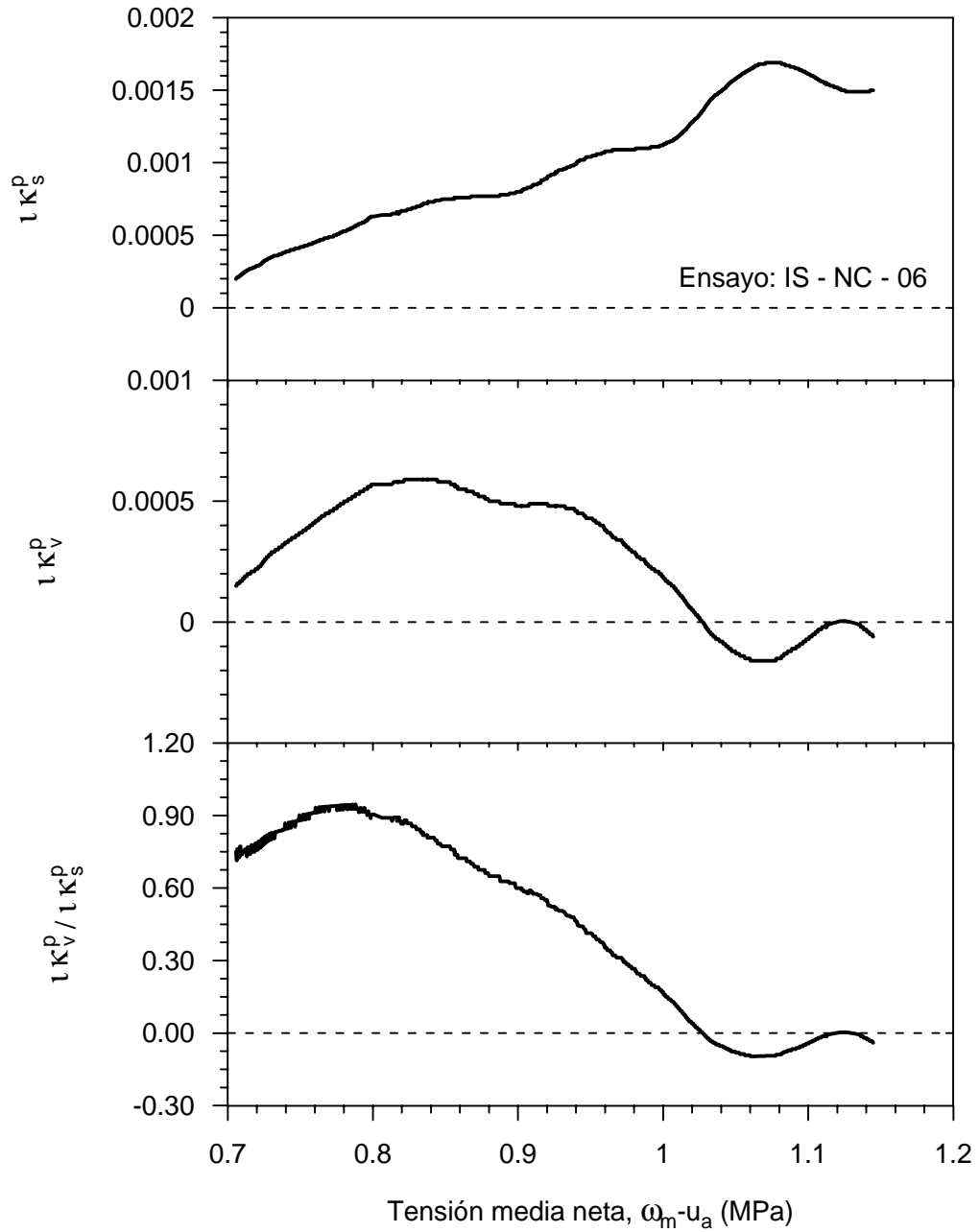


Figura 6.72 Variación en la dirección del incremento de las deformaciones plásticas, como una función de p para $\tau q / \tau p = 3$ y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IS – NC – 06.

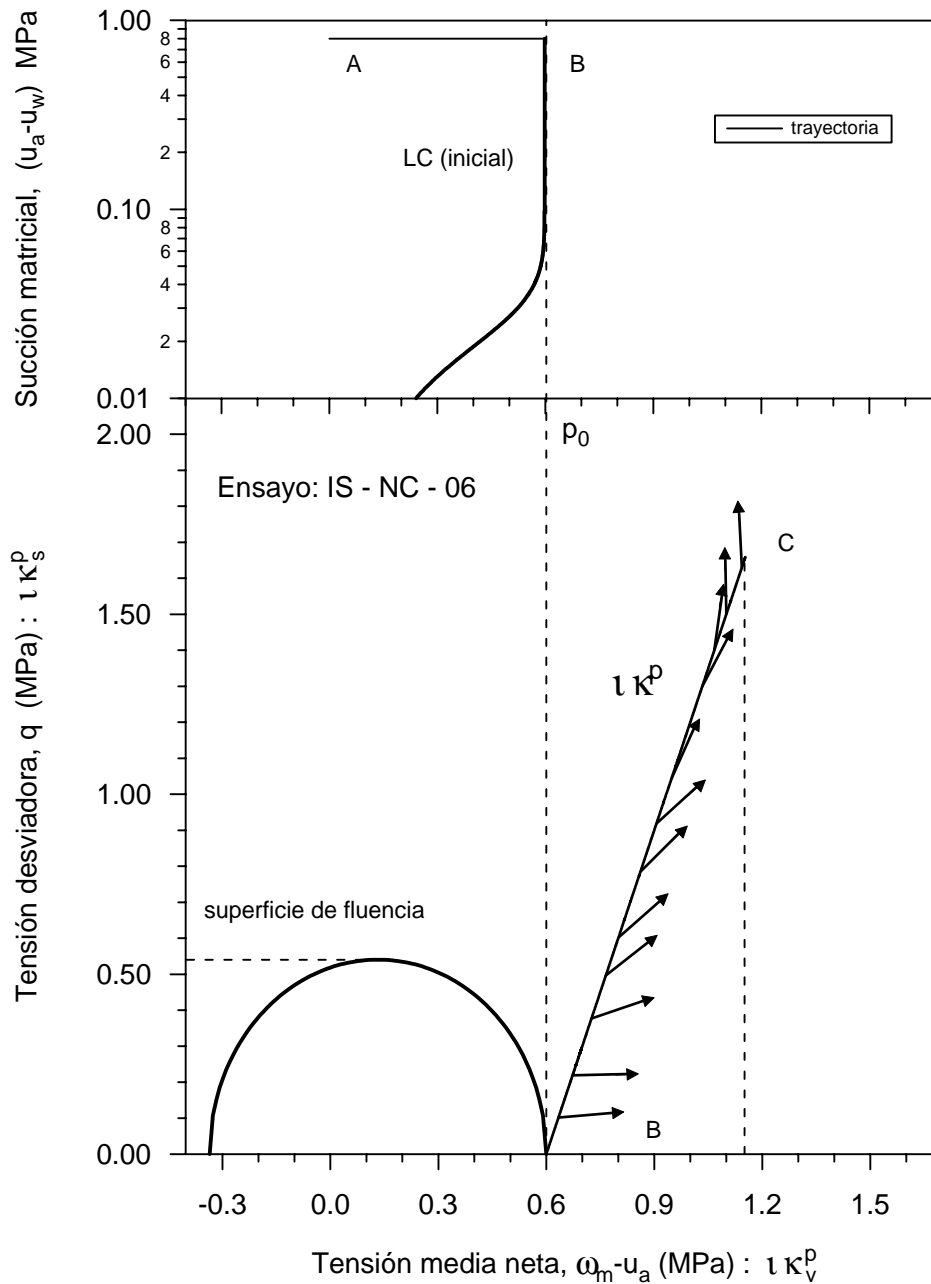


Figura 6.73 Superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de esfuerzos, y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – NC – 06.

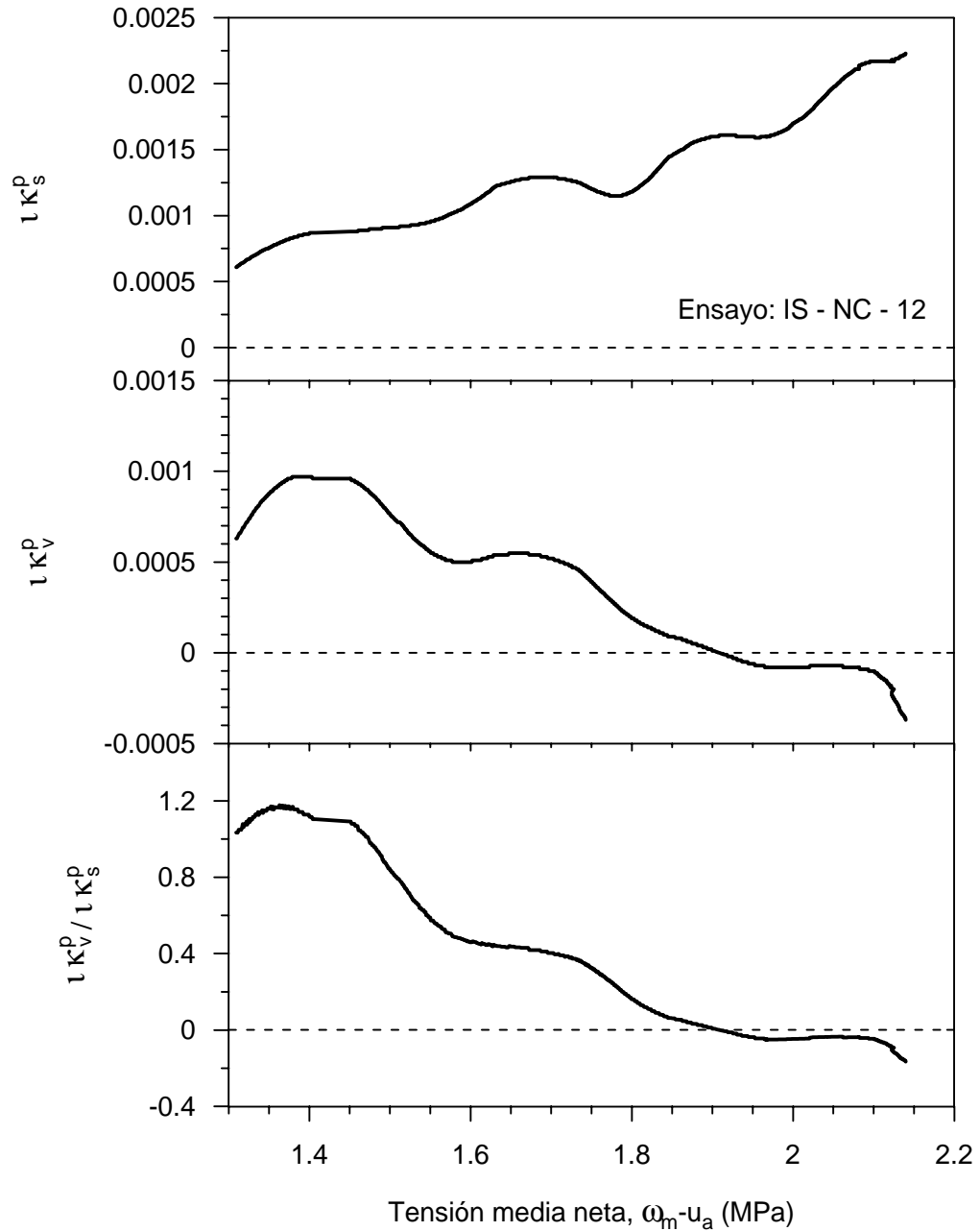


Figura 6.74 Variación en la dirección del incremento de las deformaciones plásticas, como una función de p para $tq / tp = 3$ y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IS – NC – 12.

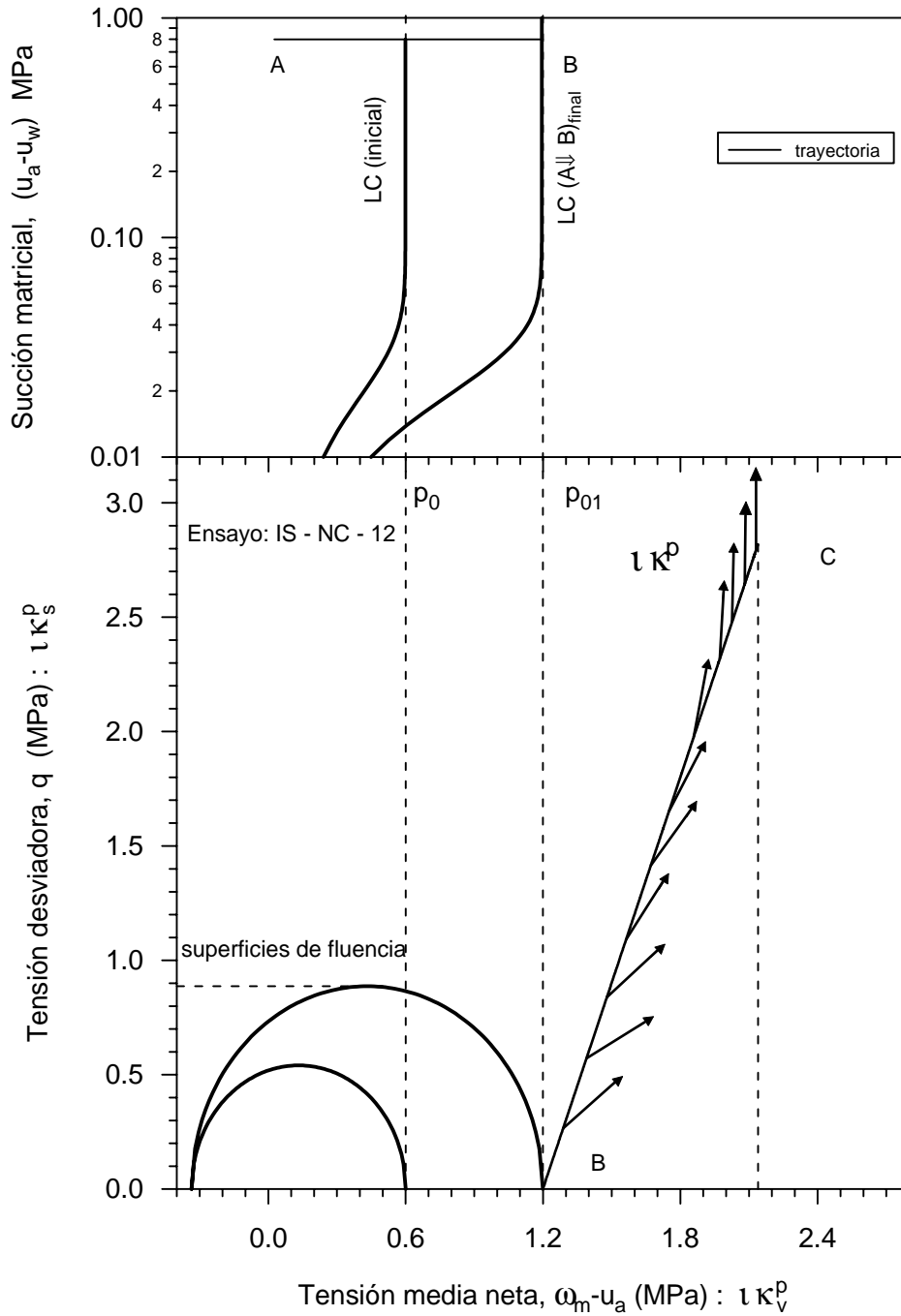


Figura 6.75 Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos en las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – NC – 12.

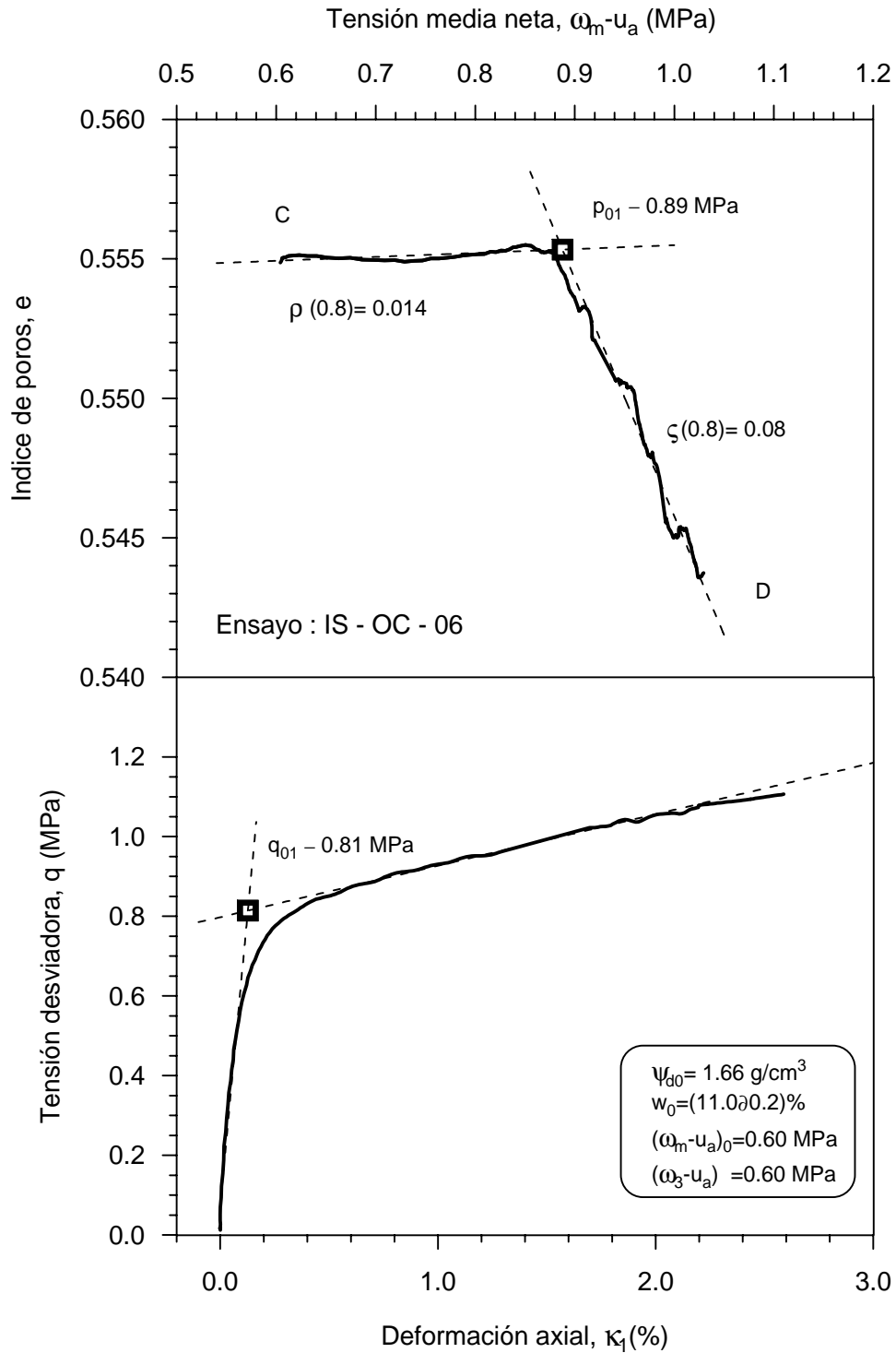


Figura 6.76 Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IS – OC – 06.

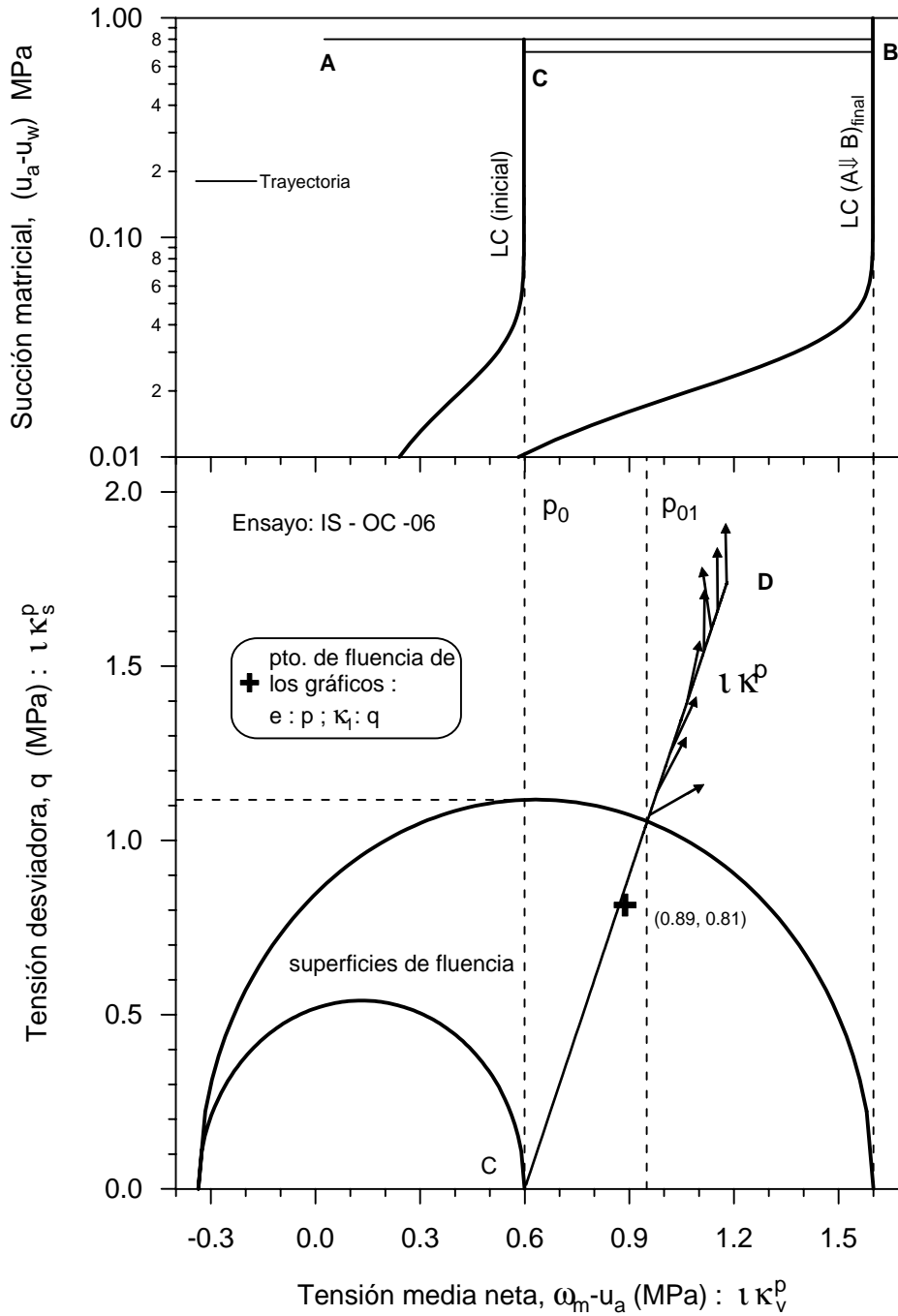


Figura 6.77 Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos en las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – OC – 06.

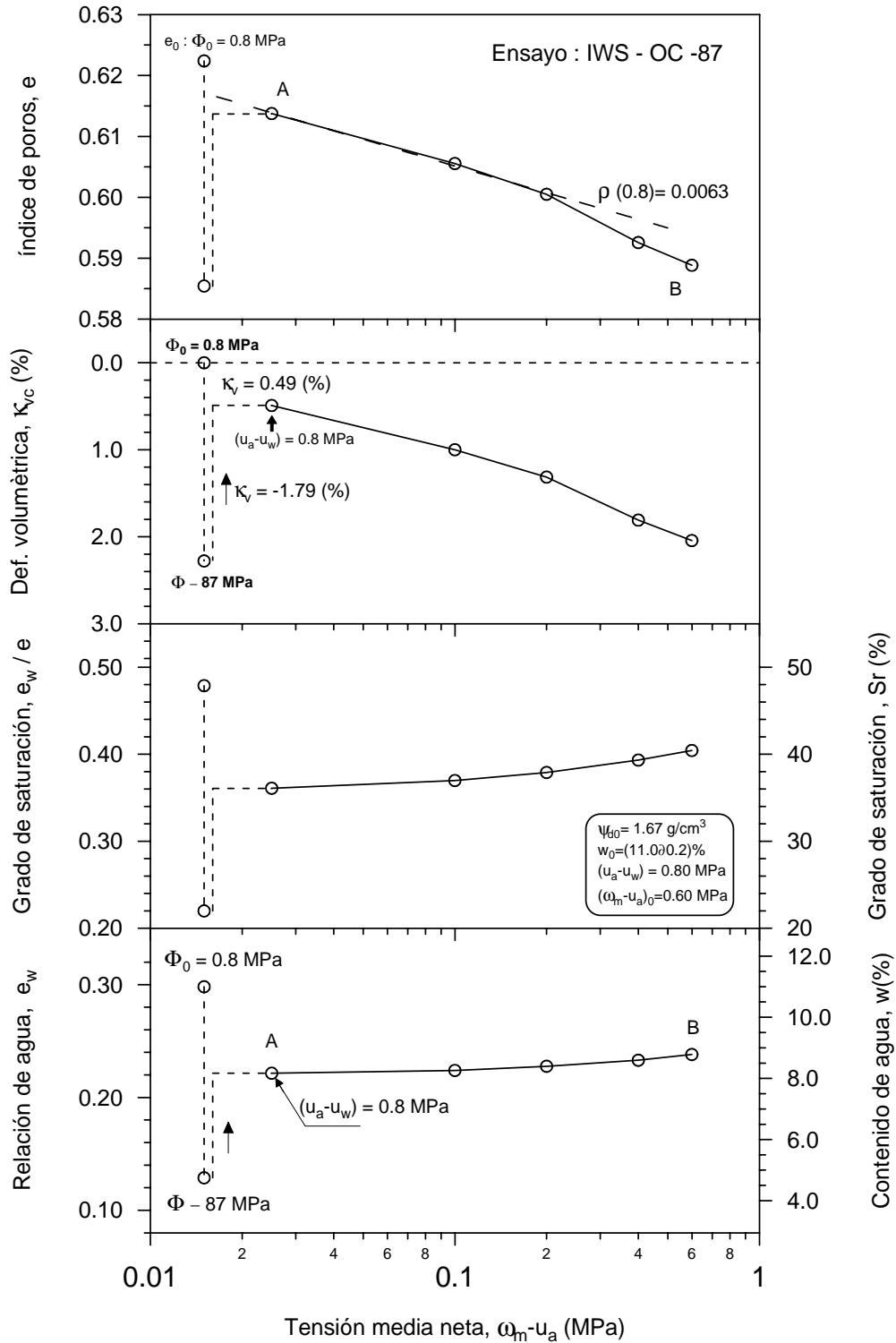


Figura 6.78 Deformación volumétrica en una trayectoria de secado a una succión total ($\Phi = 87 \text{ MPa}$). Trayectoria de carga isotrópica (A \downarrow B) a succión matricial constante ($u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$). Ensayo de compresión triaxial IS - NC - 12.

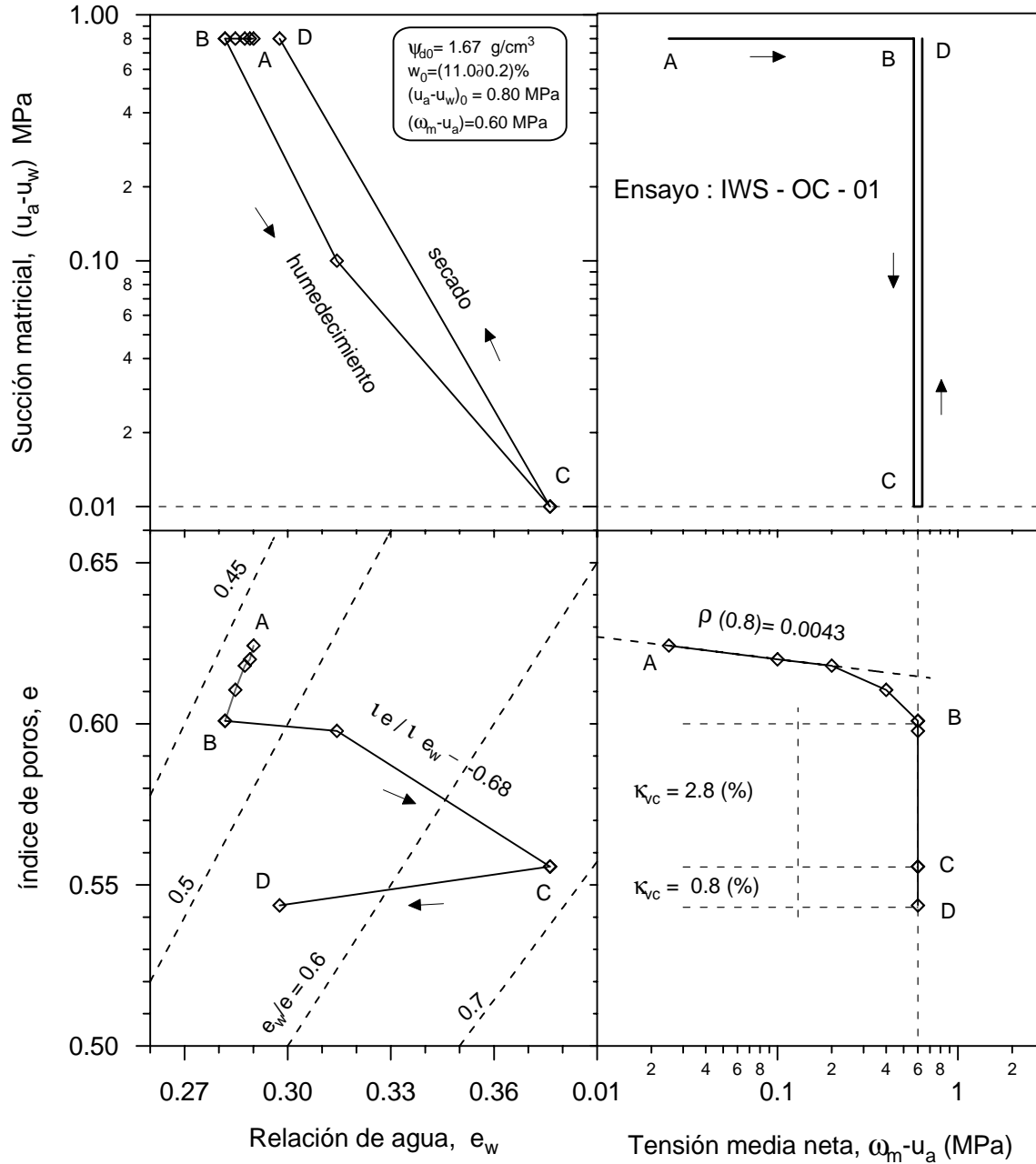


Figura 6.79 Resultados de compresión triaxial obtenidos con la célula triaxial, representados en los planos s : $(\omega_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria de carga isotrópica (A-B), y ciclo de humedecimiento – secado (B-C-D). Ensayo IWS – OC – 01.

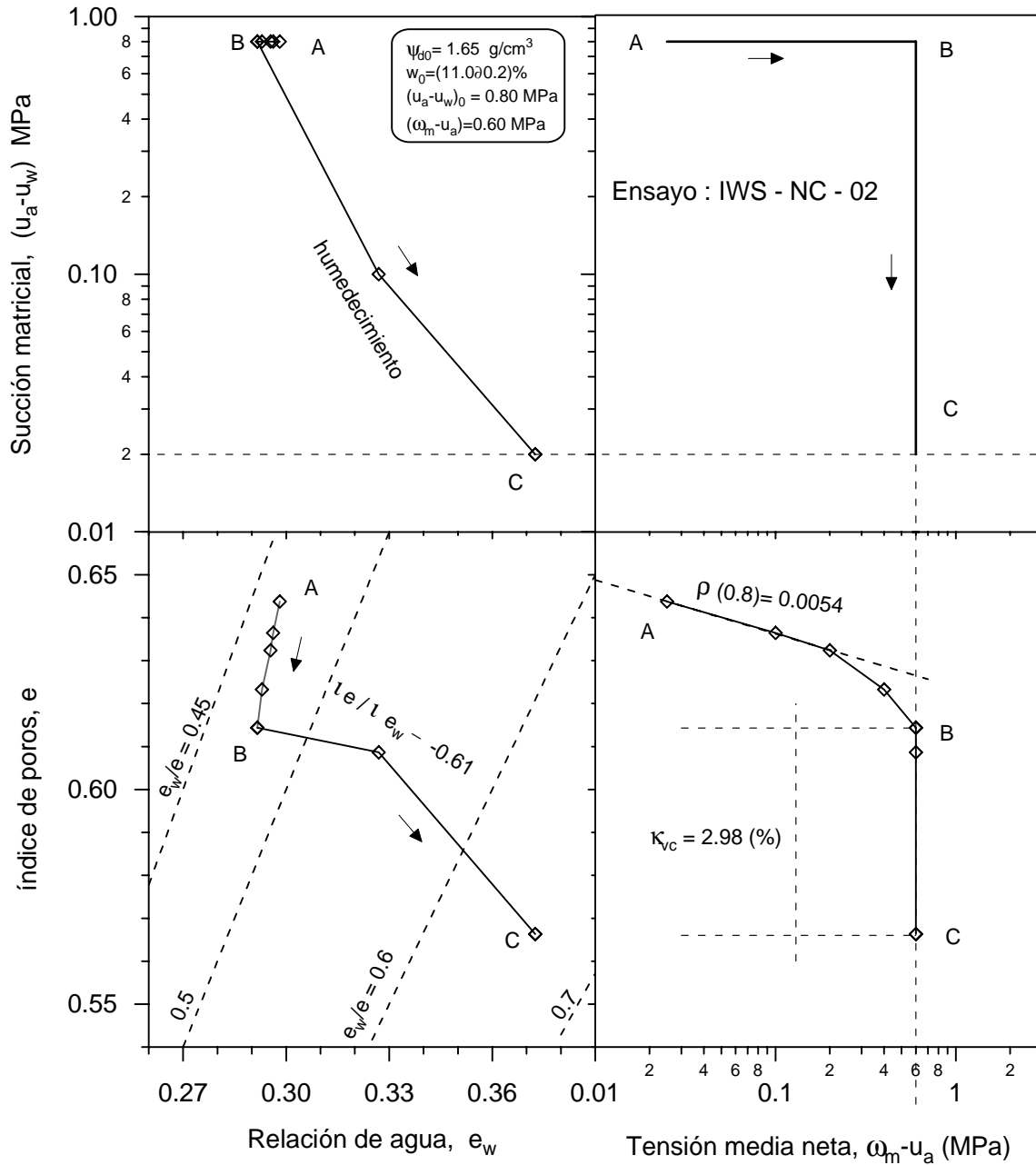


Figura 6.80 Resultados de compresión triaxial obtenidos con la célula triaxial, representados en los planos $s : (\alpha_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria de carga isotrópica (A-B) y de humedecimiento (B-C). Ensayo IWS - NC - 02.

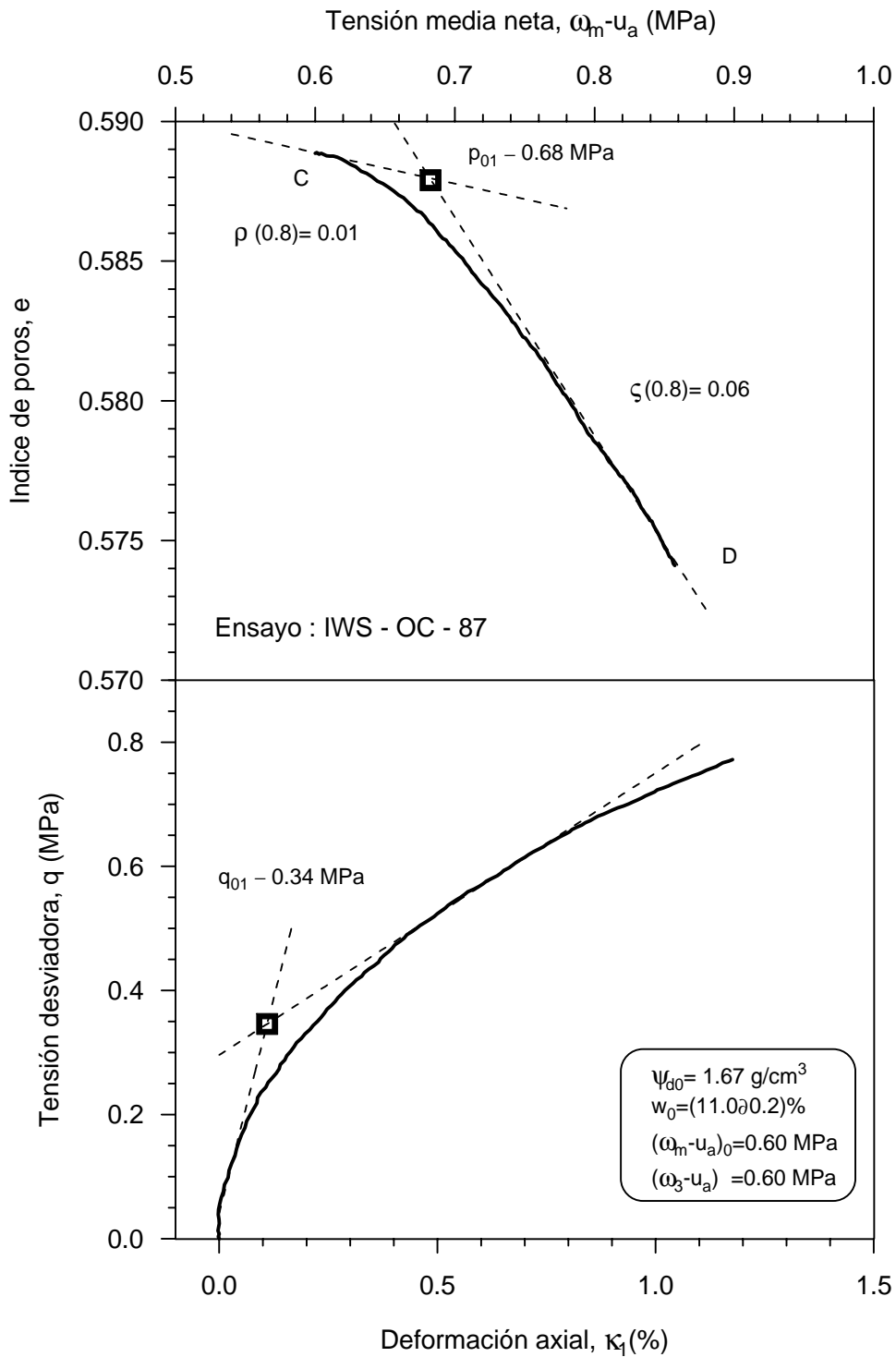


Figura 6.81a Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 87.

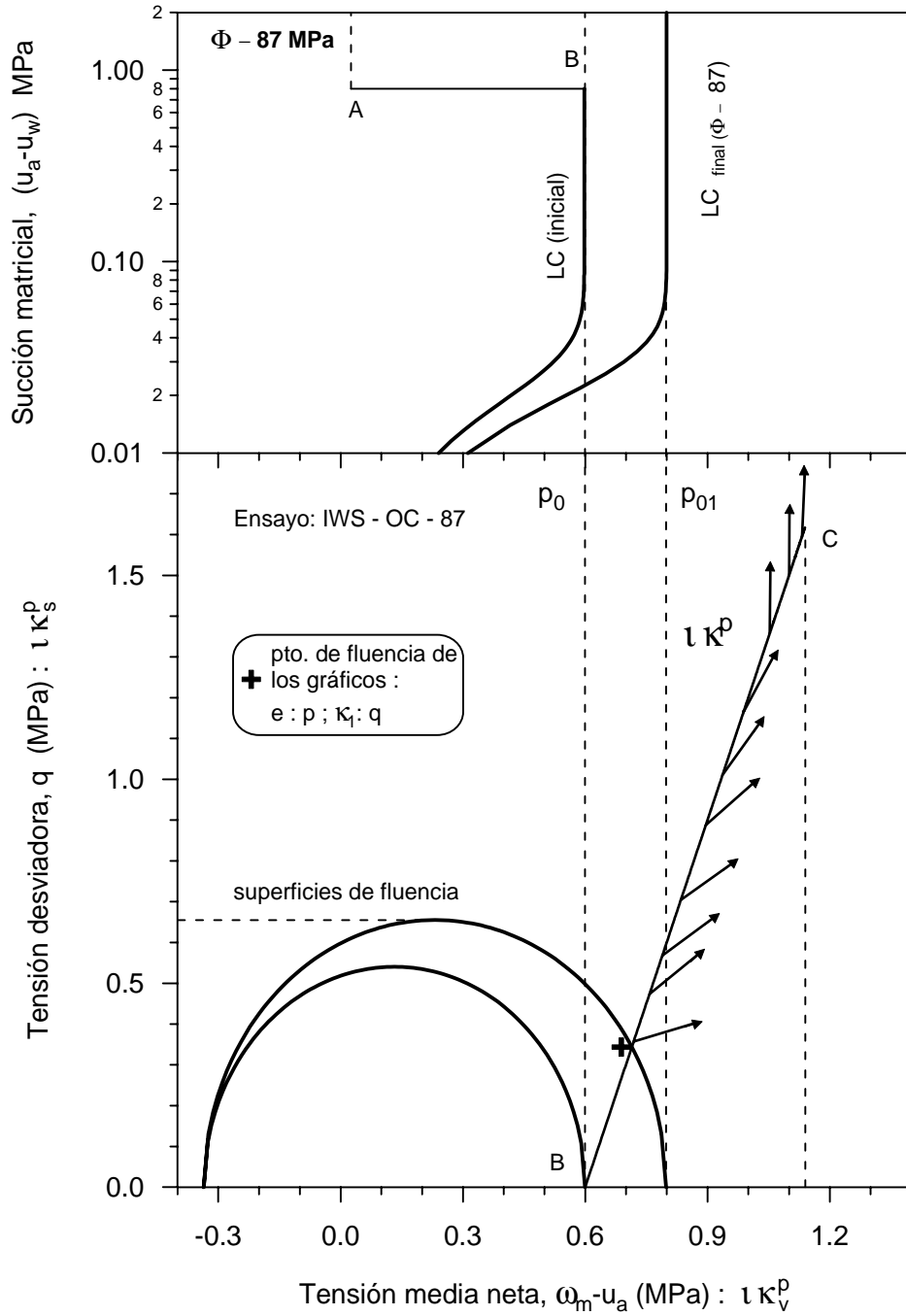


Figura 6.81b Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial SI a $\Phi = 87$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 87.

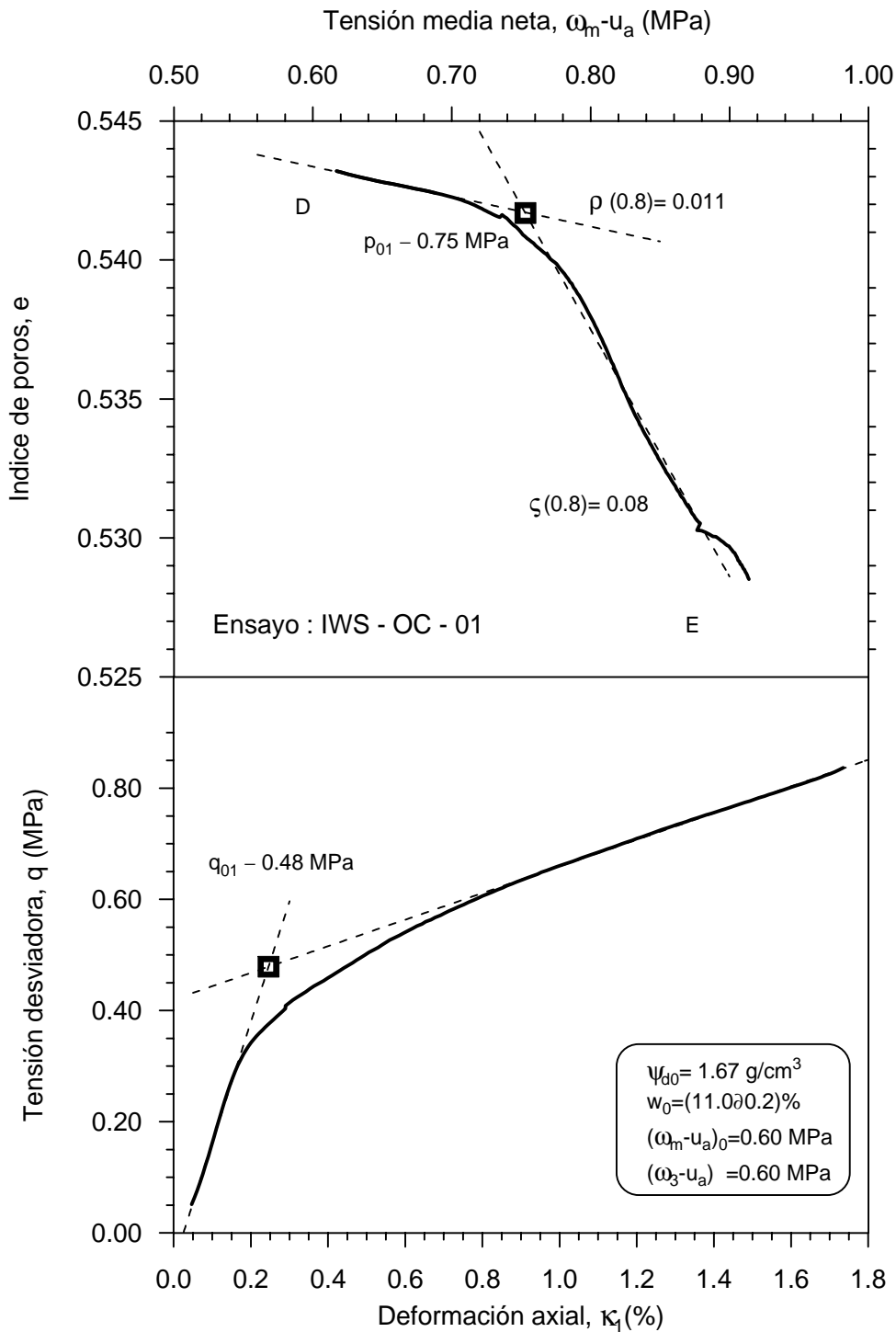


Figura 6.82 Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 01.

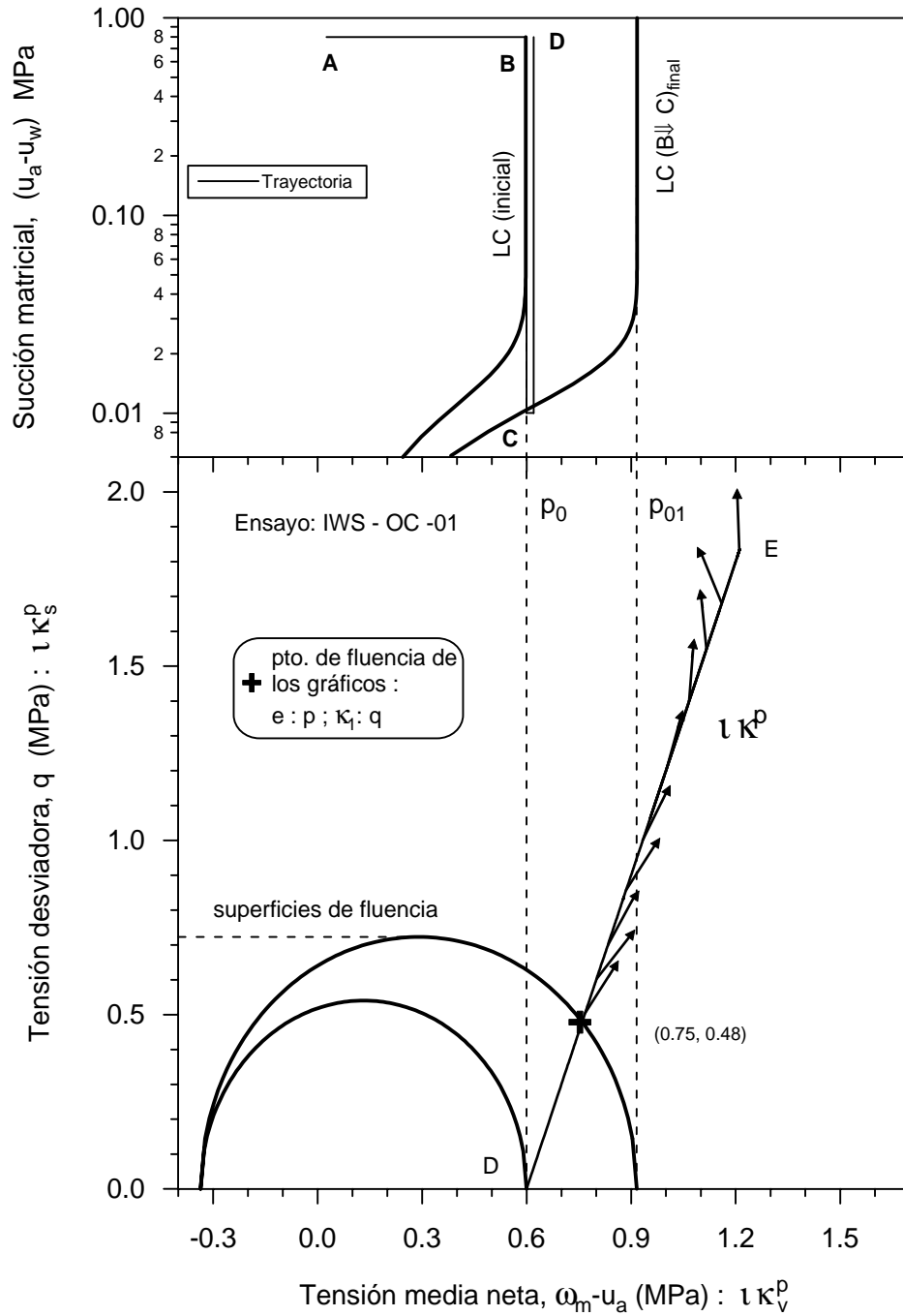


Figura 6.83 Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial, trayectoria de esfuerzos y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 01.

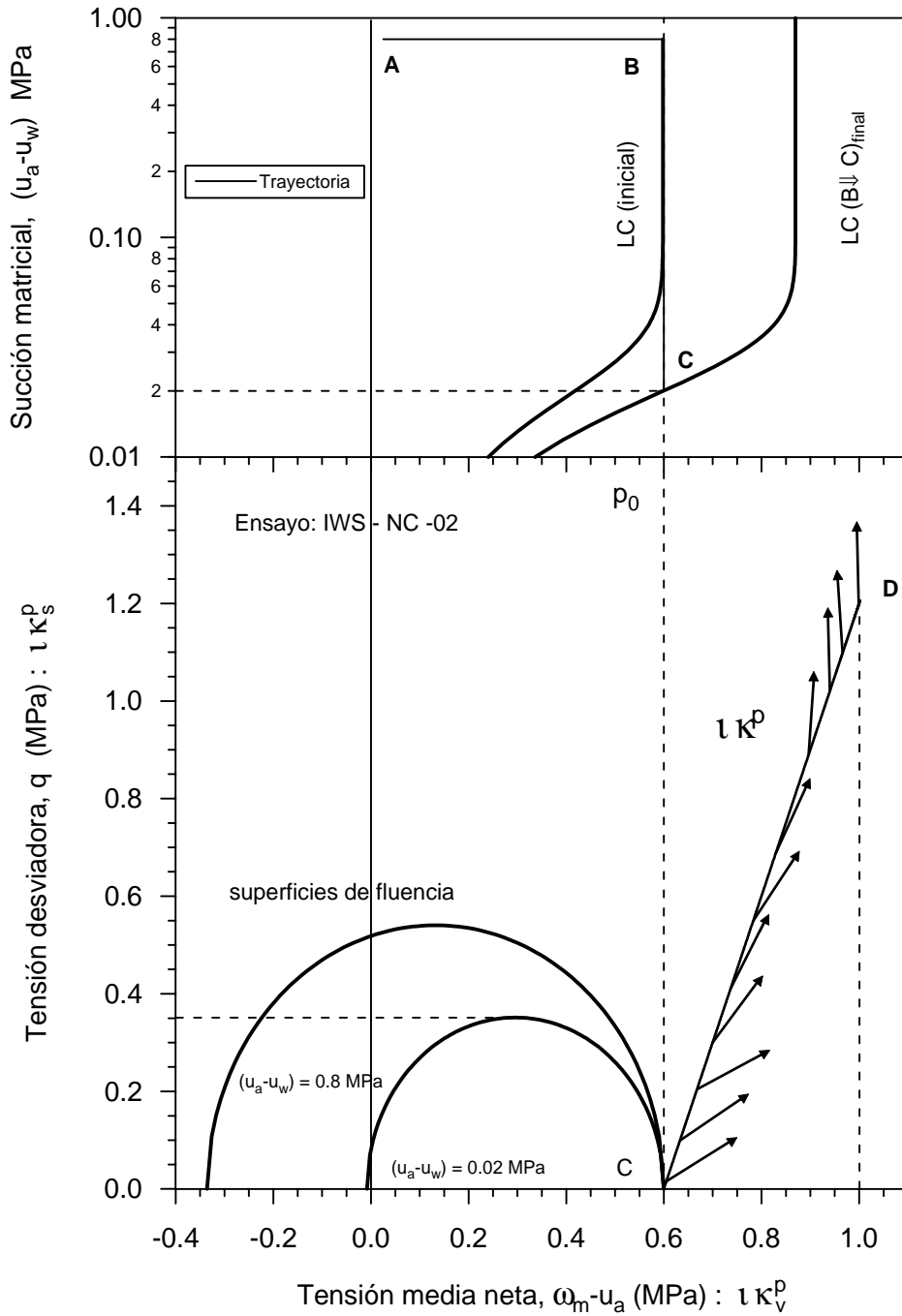


Figura 6.84 Superficie de fluencia inicial ($s = 0.8$ MPa), y superficie de fluencia a $s = 0.02$ MPa, trayectoria de esfuerzos y vectores que indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte a una $s = 0.02$ MPa. Ensayo IWS – NC – 02.

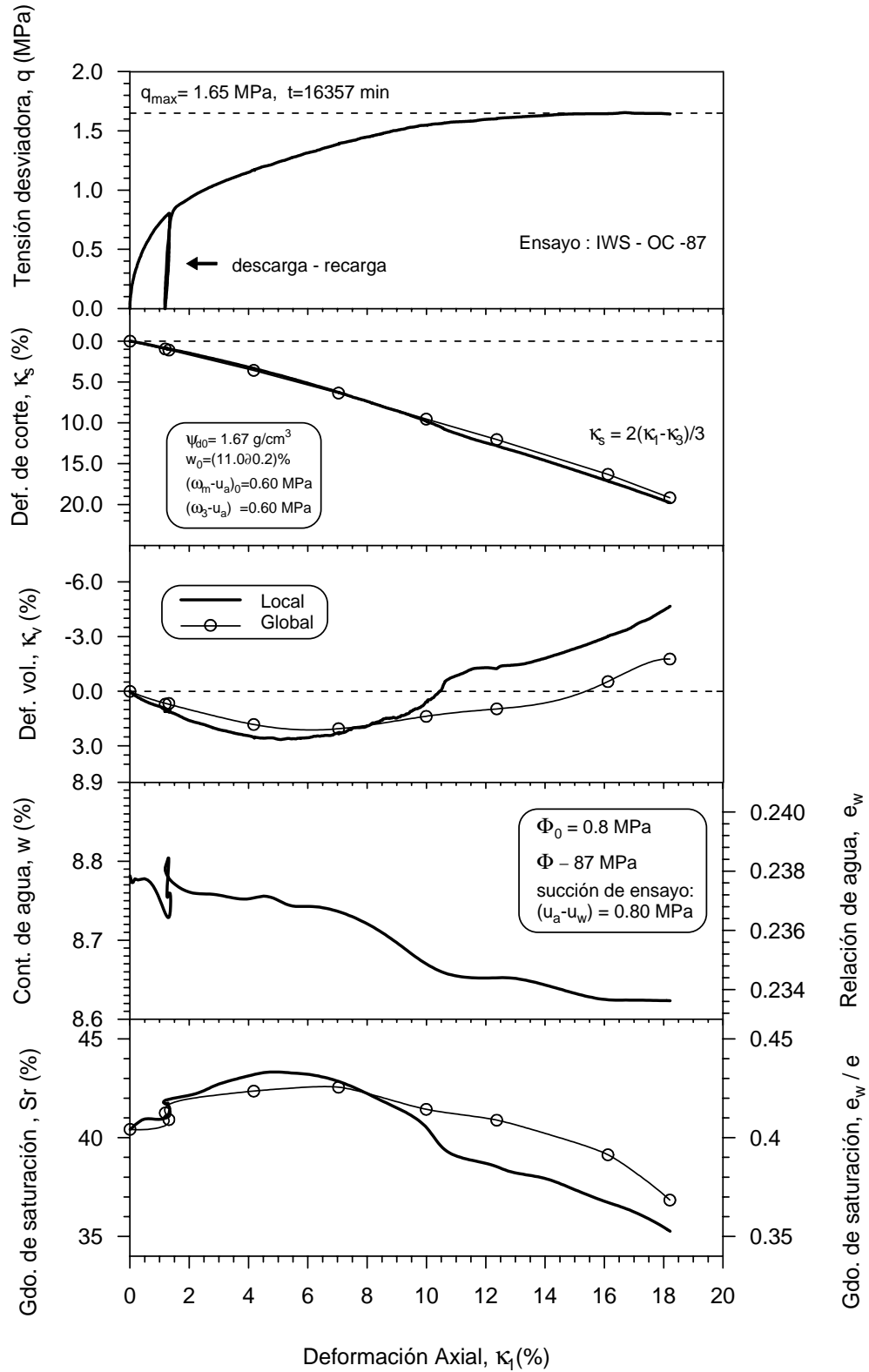


Figura 6.85 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IWS – OC – 87.

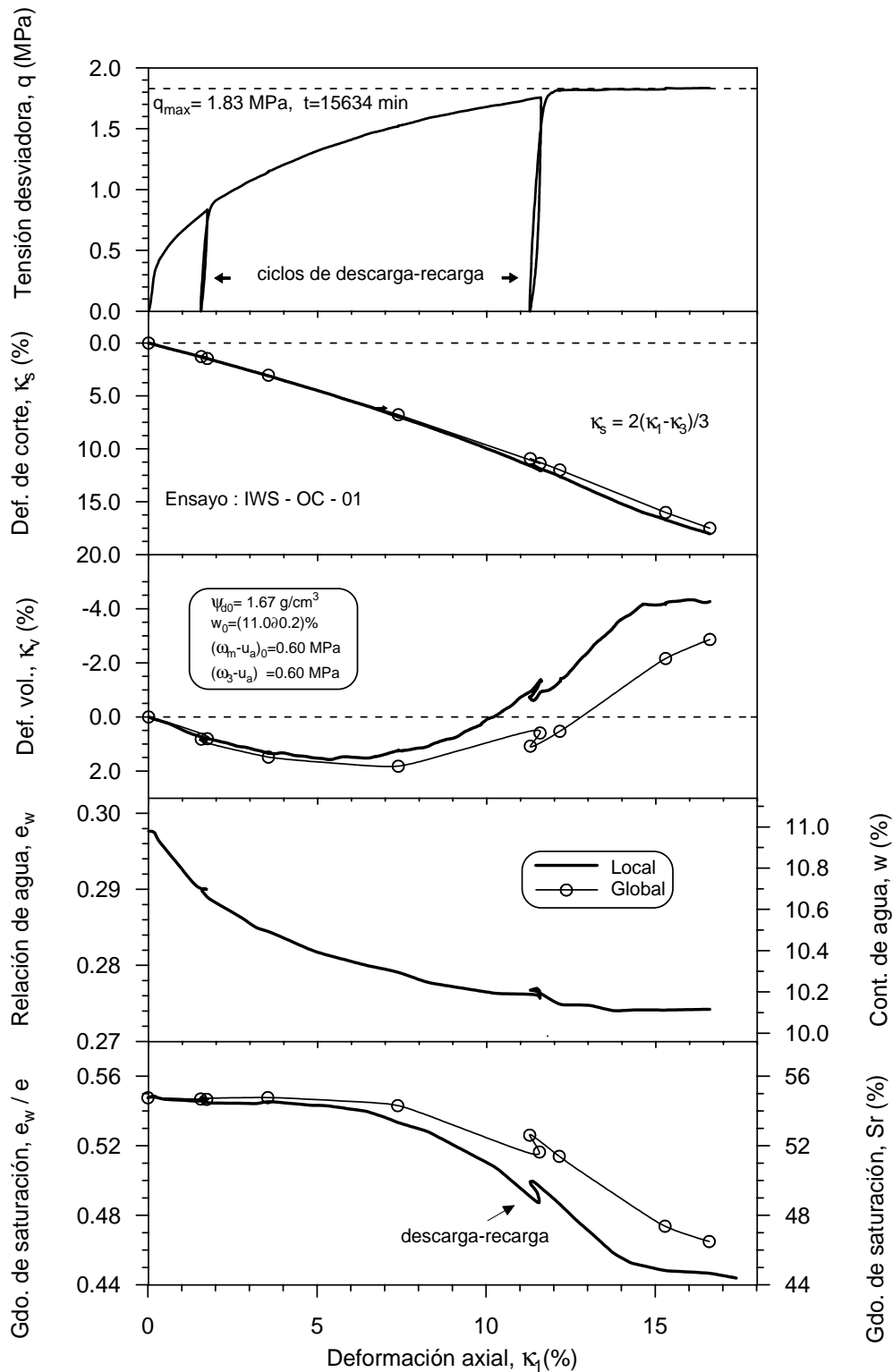


Figura 6.86 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IWS – OC – 01.

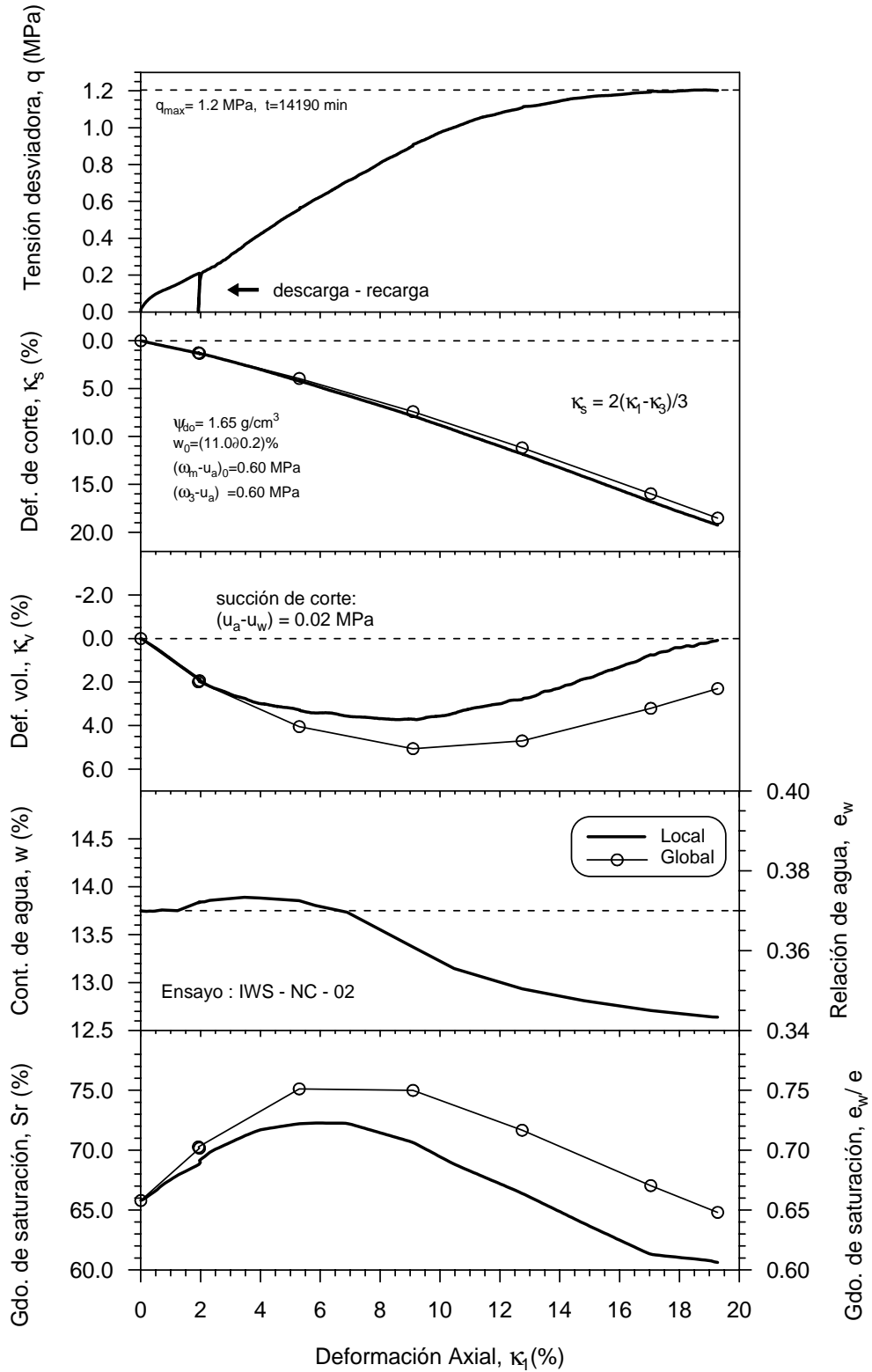


Figura 6.87 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IWS – NC – 02.

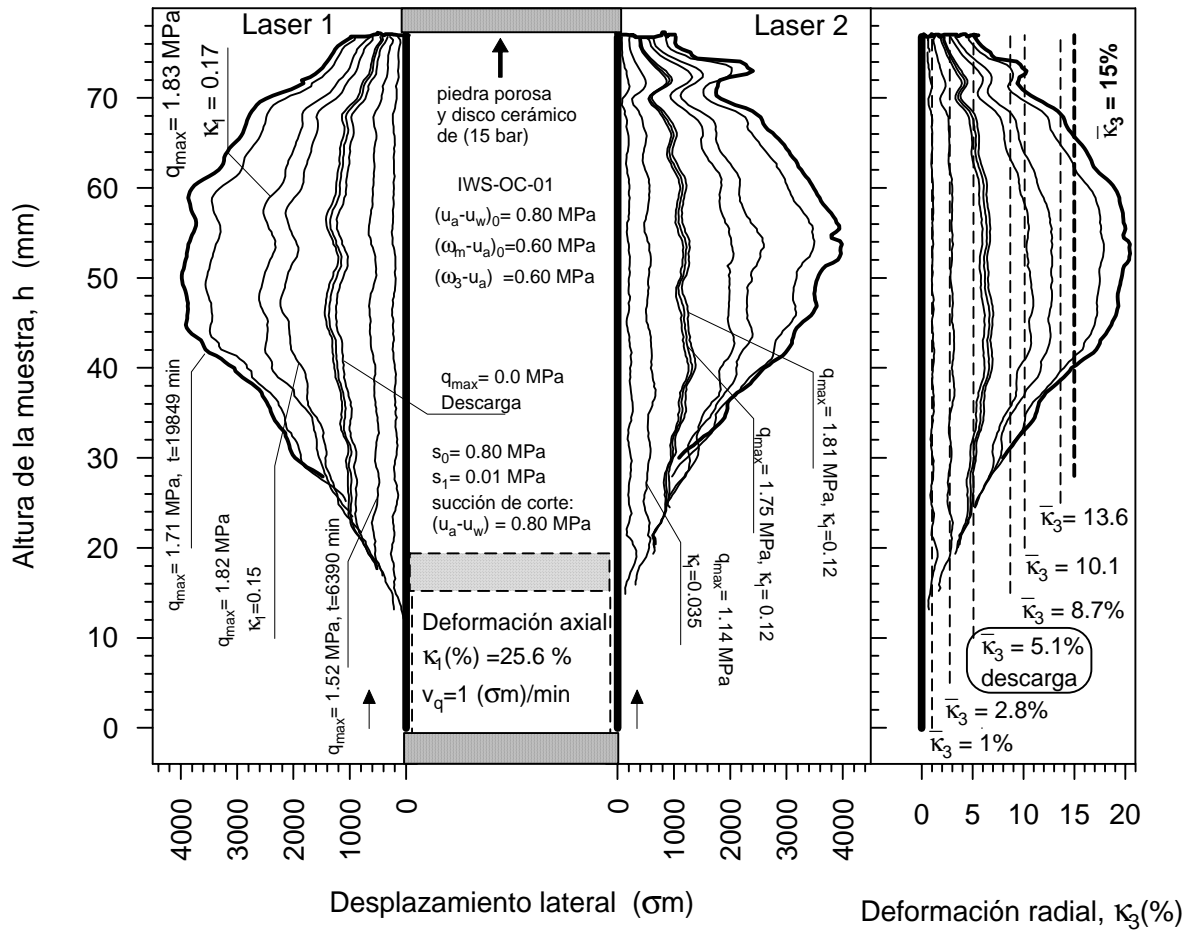


Figura 6.88 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IWS – OC – 01.

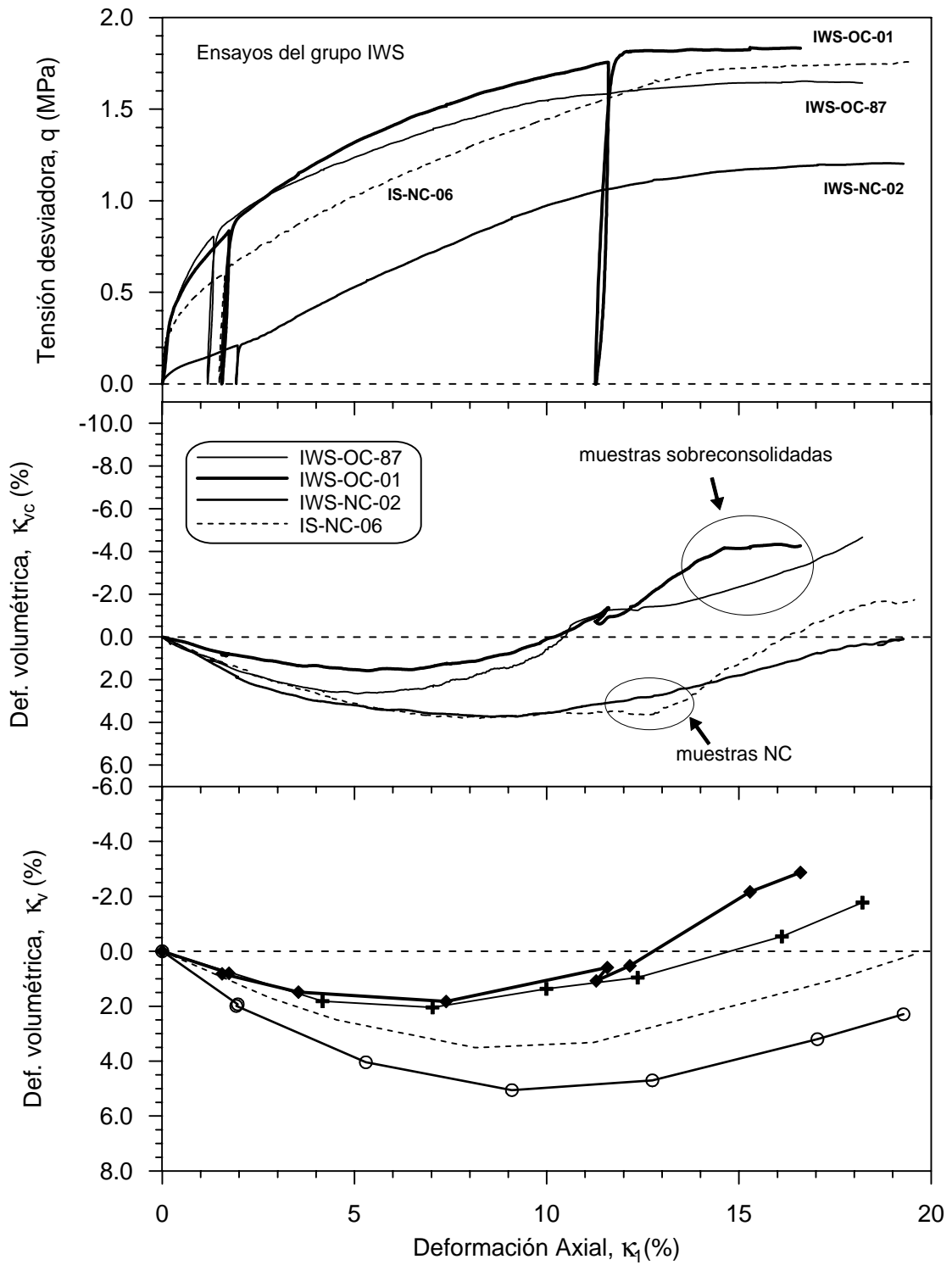


Figura 6.89 Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica local y global de los ensayos del grupo IWS, en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.

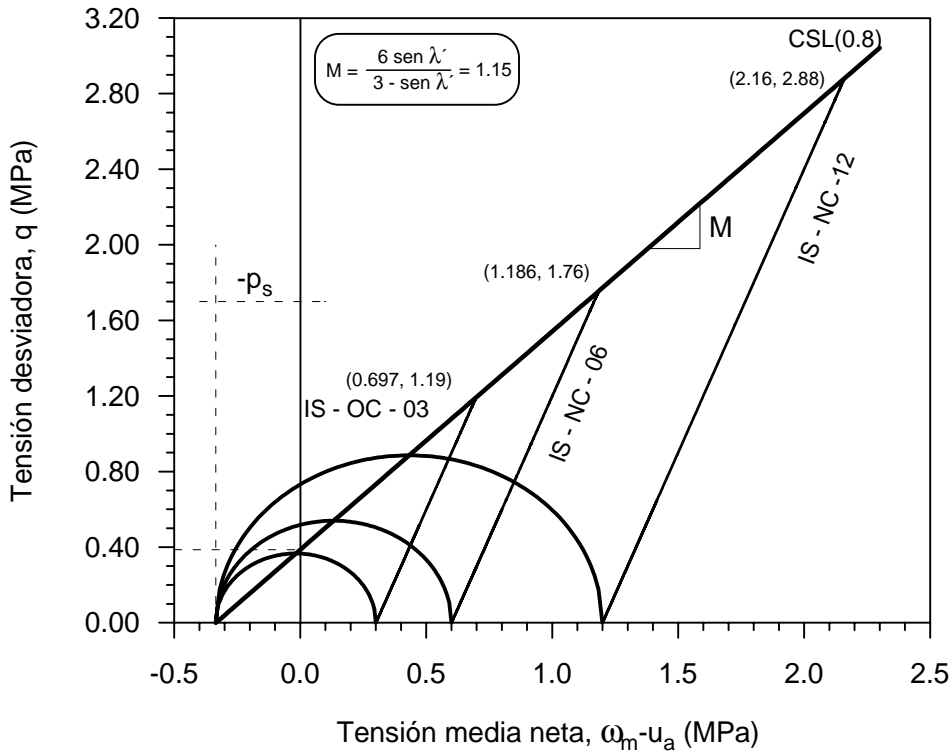


Figura 6.90 Línea de estado crítico en muestras no saturadas ($s = 0.8$ MPa), en el plano esfuerzo desviador – esfuerzo medio neto.

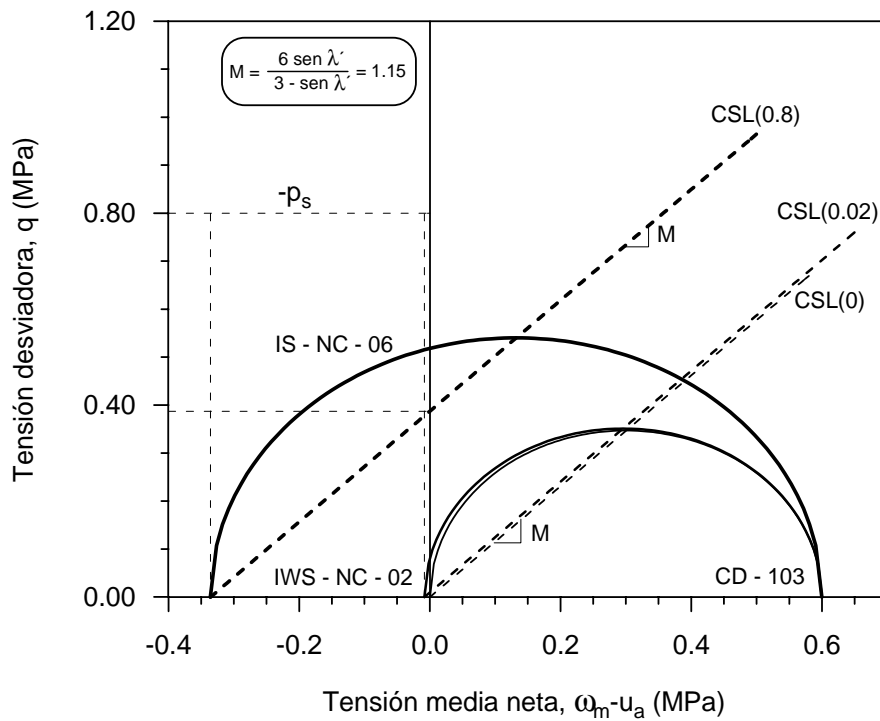


Figura 6.91 Líneas de estado crítico en muestras bajo succión constante de .8 MPa y 0.02 MPa, y en muestras saturadas representadas en el plano esfuerzo desviador – esfuerzo medio neto.

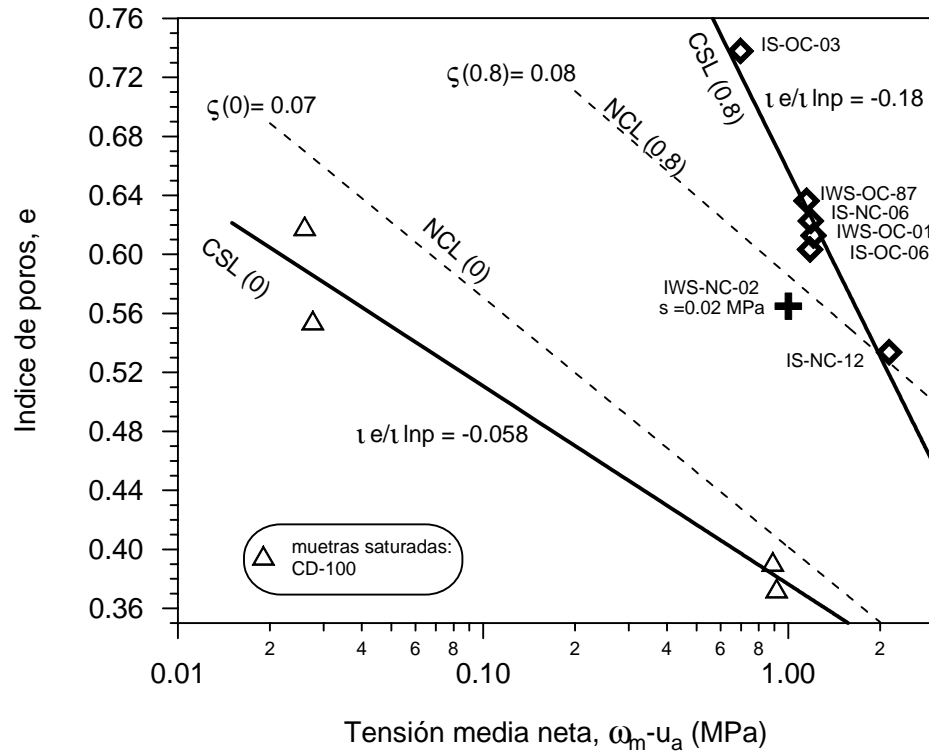


Figura 6.92 Línea de estado crítico en el plano $\ln(\sigma_m - u_a) : e$ en muestras a succión constante ($s = 0.8$ MPa) y en muestras saturadas.

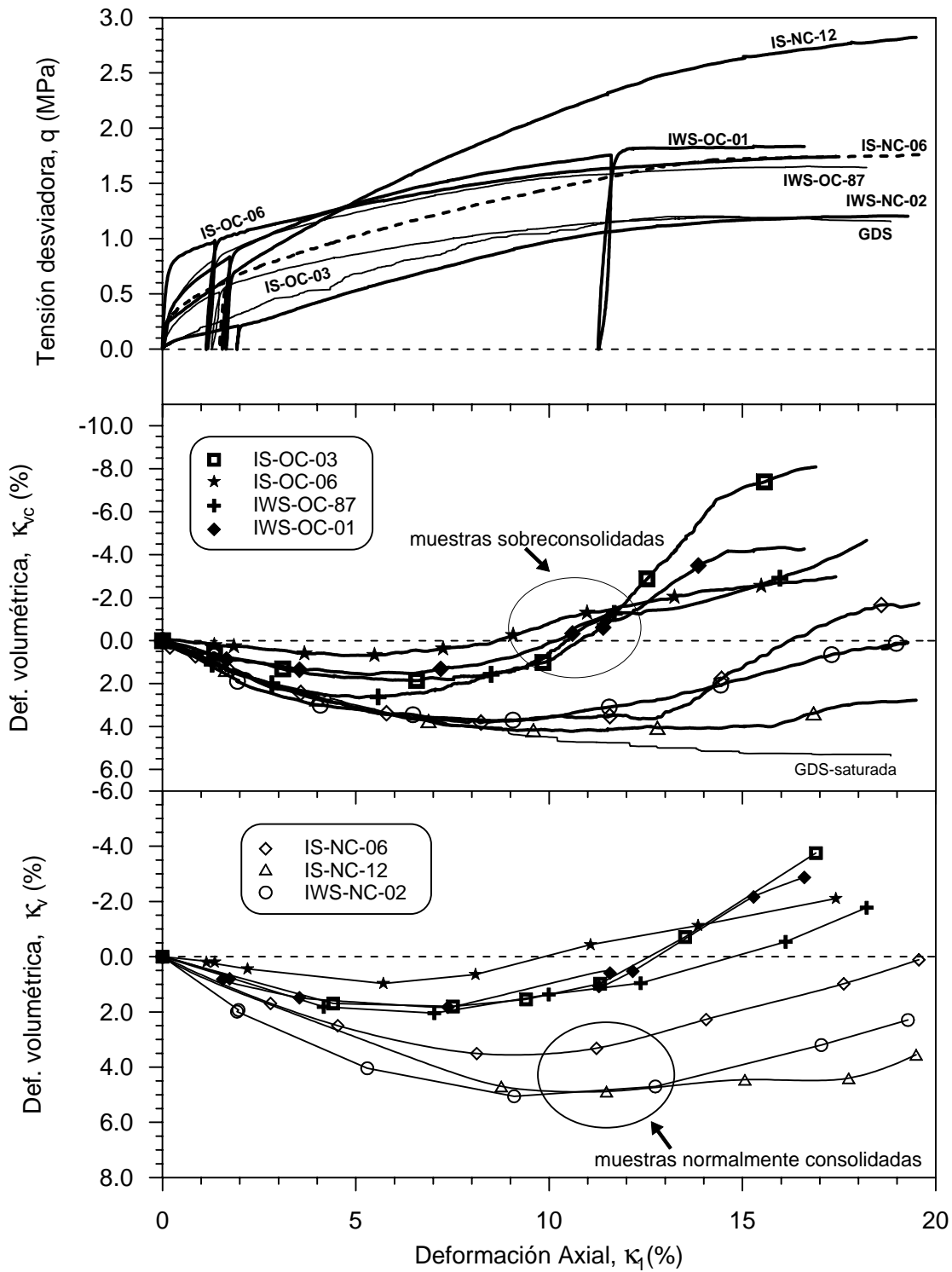


Figura 6.93 Resultado de los ensayos del grupo IS y IWS en la etapa de rotura. Variación del esfuerzo desviador, deformación volumétrica local y global en muestras sobreconsolidadas, y normalmente consolidadas.

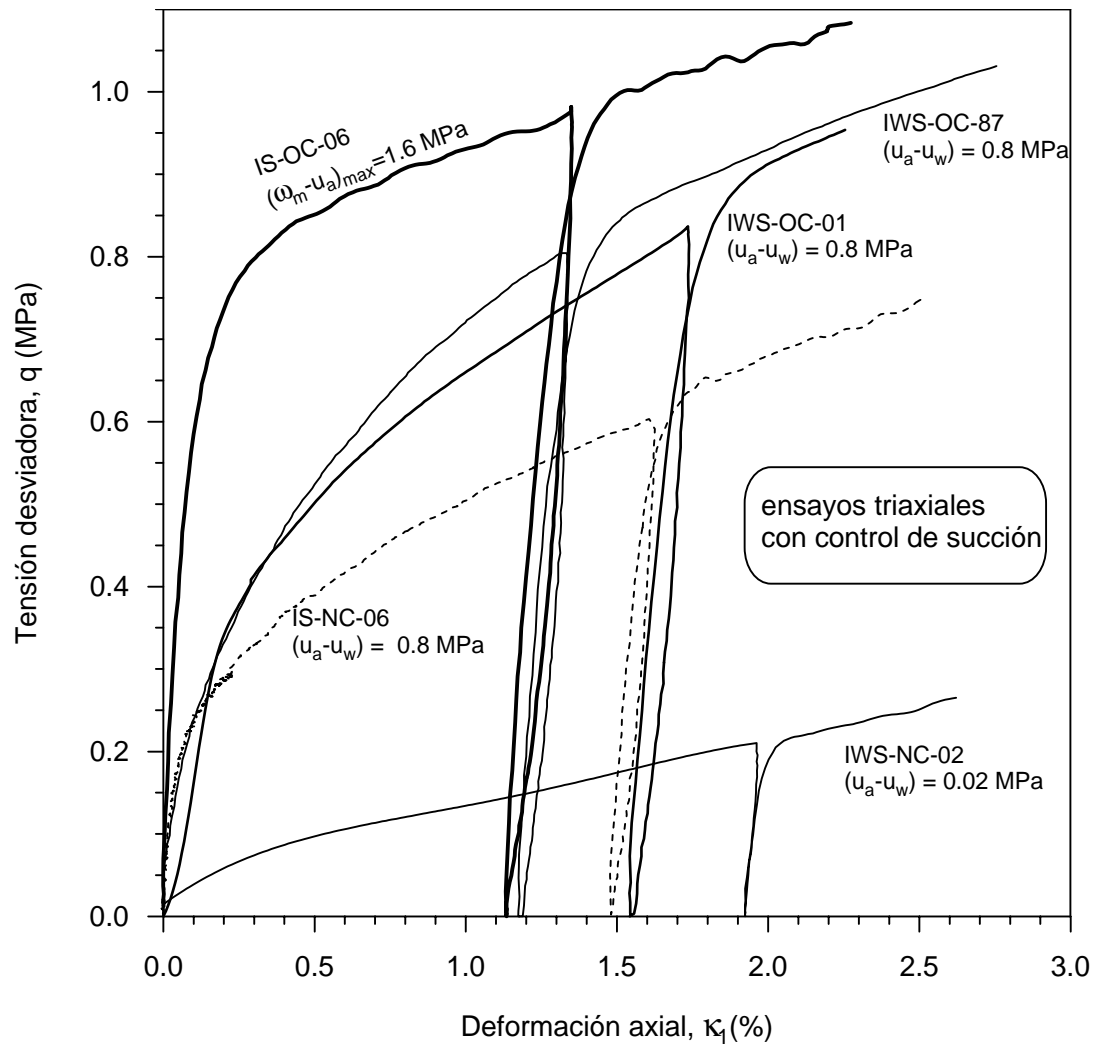


Figura 6.94a Influencia del incremento de la succión en los ensayos, y la rigidez de las muestras sobreconsolidadas por un proceso hidráulico y mecánico antes de la etapa de corte.

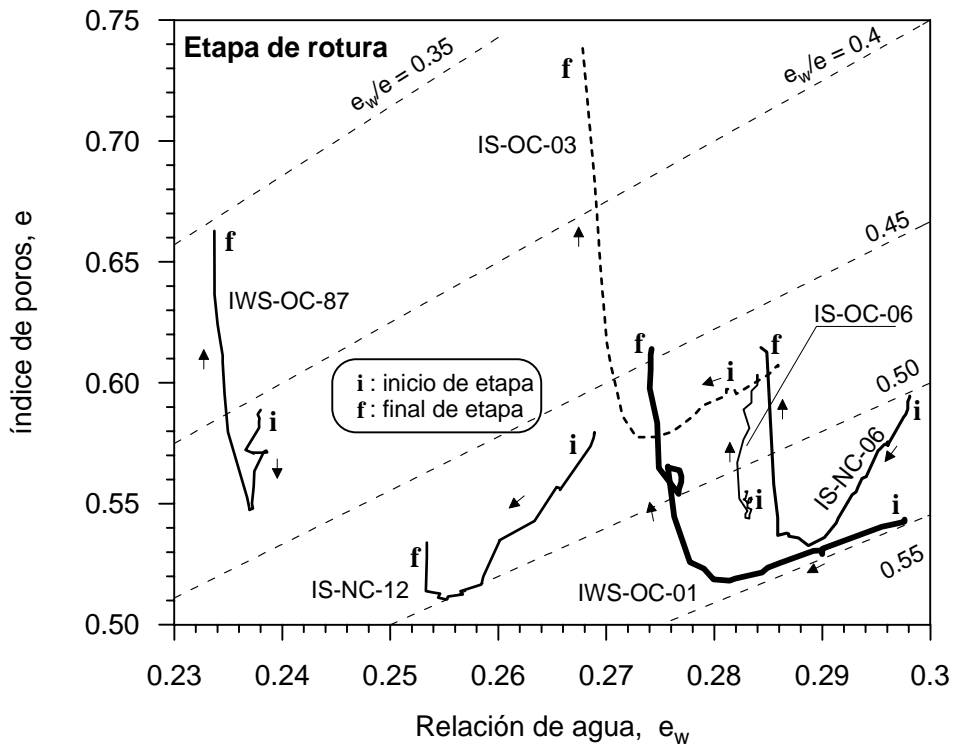


Figura 6.94b Variación del índice de poros con respecto a la relación de agua durante la etapa de rotura a succión constante ($s = 0.8$ MPa).

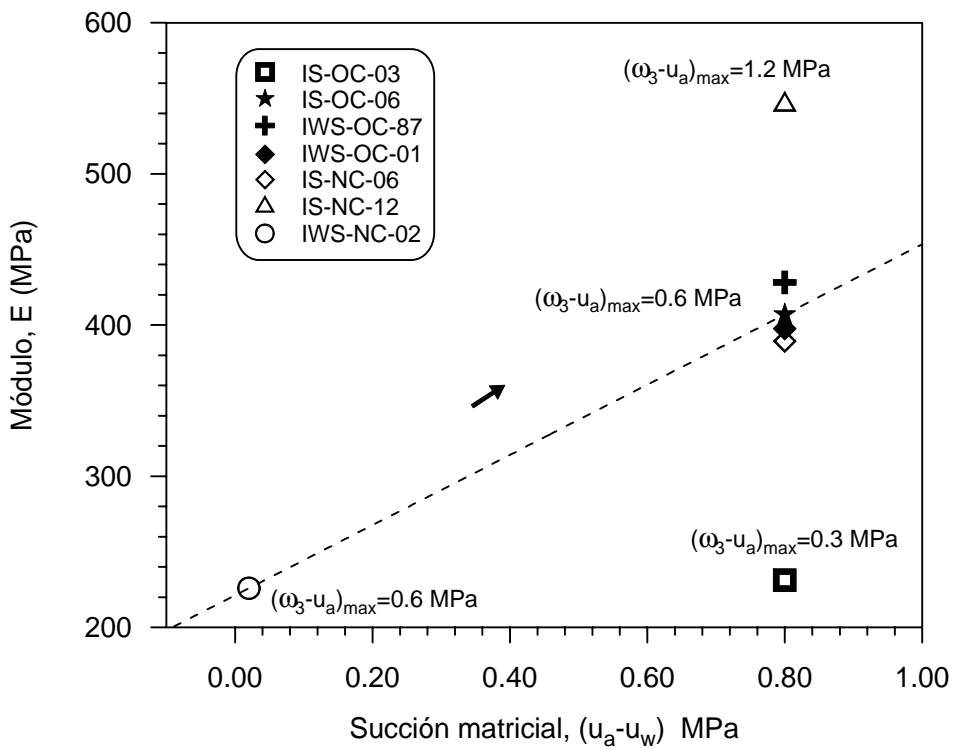


Figura 6.95 Influencia de la succión sobre el módulo de Young (E).

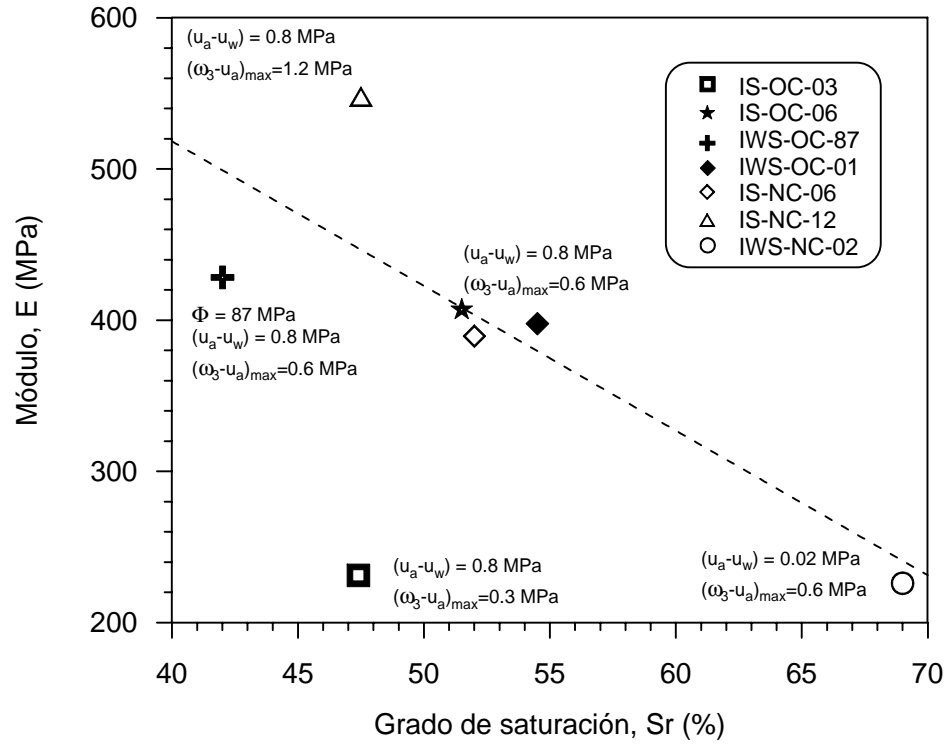


Figura 6.96 Influencia del grado de saturación sobre el módulo de Young (E).

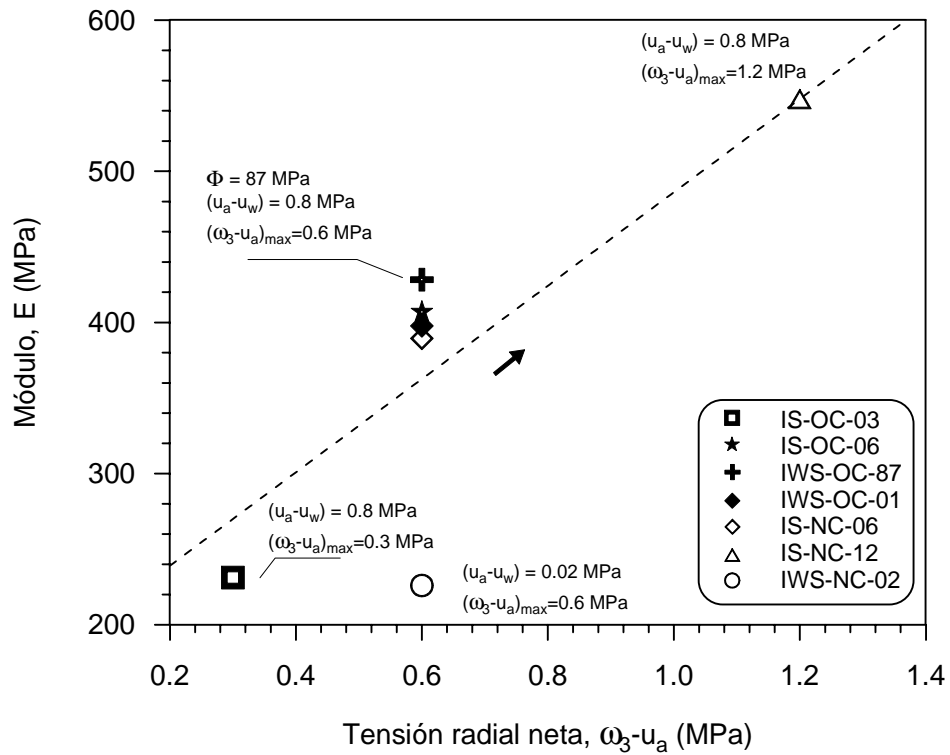


Figura 6.97 Influencia del esfuerzo radial neta sobre el módulo de Young (E).

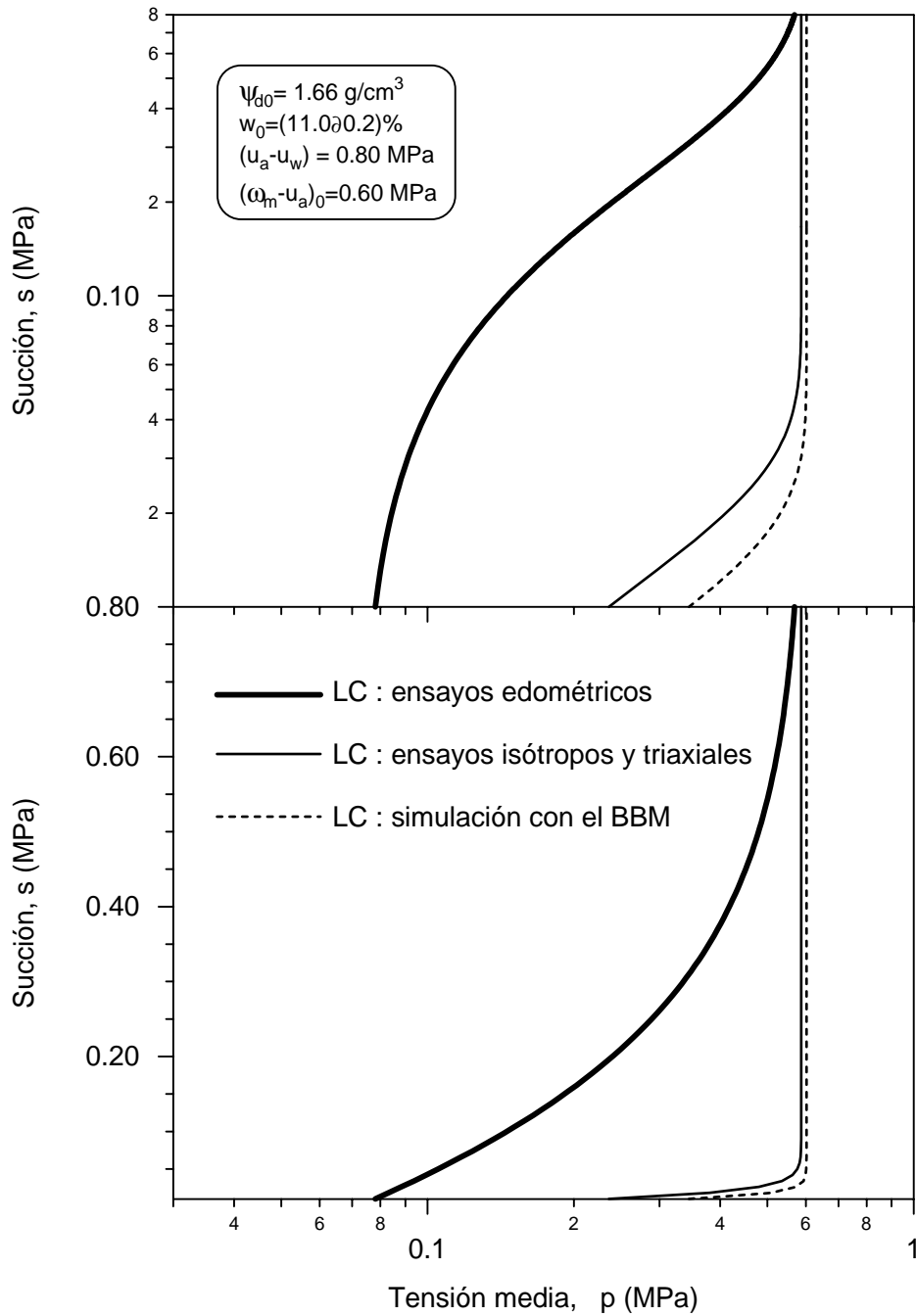


Figura 6.98 Forma de la superficie de fluencia inicial para un esfuerzo de compactación isotrópica de 0.6 MPa, y una succión de 0.80 MPa para cada uno de los tres conjuntos de parámetros utilizados en el trabajo de investigación.

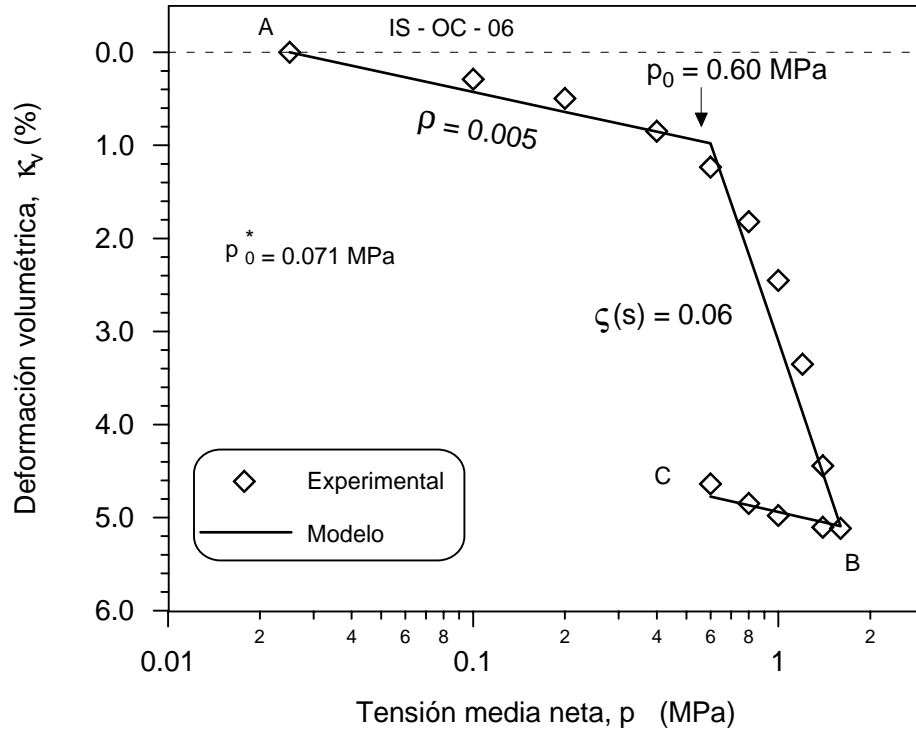


Figura 6.99 Simulación del ciclo de carga–descarga del ensayo IS-OC-06 (trayectoria A↘ B↘ C). Parámetros de compresibilidad elástico y elastoplástico.

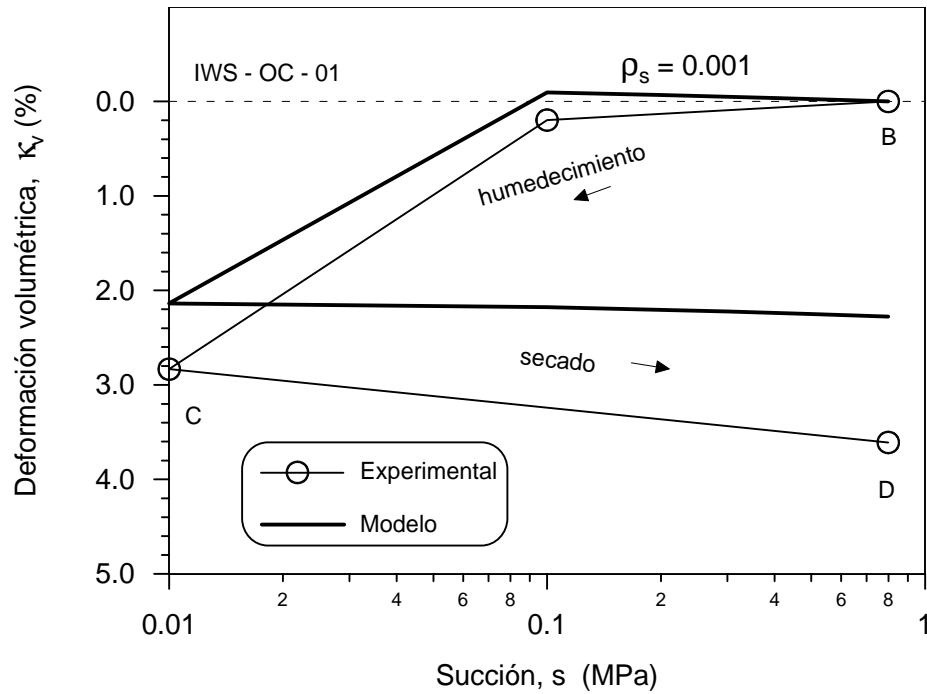


Figura 6.100 Simulación del ciclo de humedecimiento–secado del ensayo IWS-OC-01 (trayectoria B↘ C↘ D). Parámetro de rigidez elástica para cambios en succión.

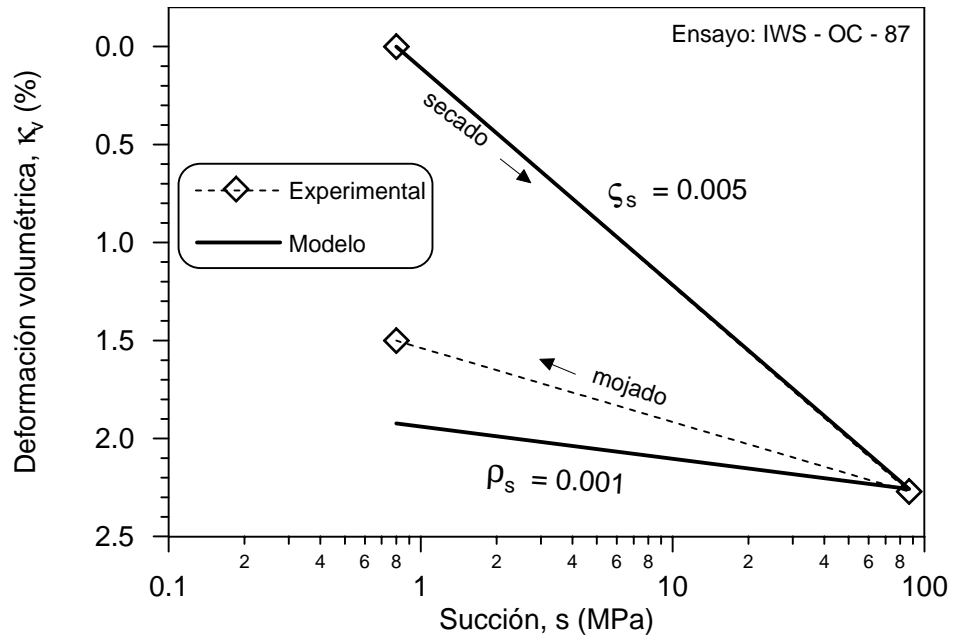


Figura 6.101 Simulación del ciclo de secado–humedecimiento del ensayo IWS-OC-87. Parámetros de rigidez elástica y elastoplástica para cambios en succión.

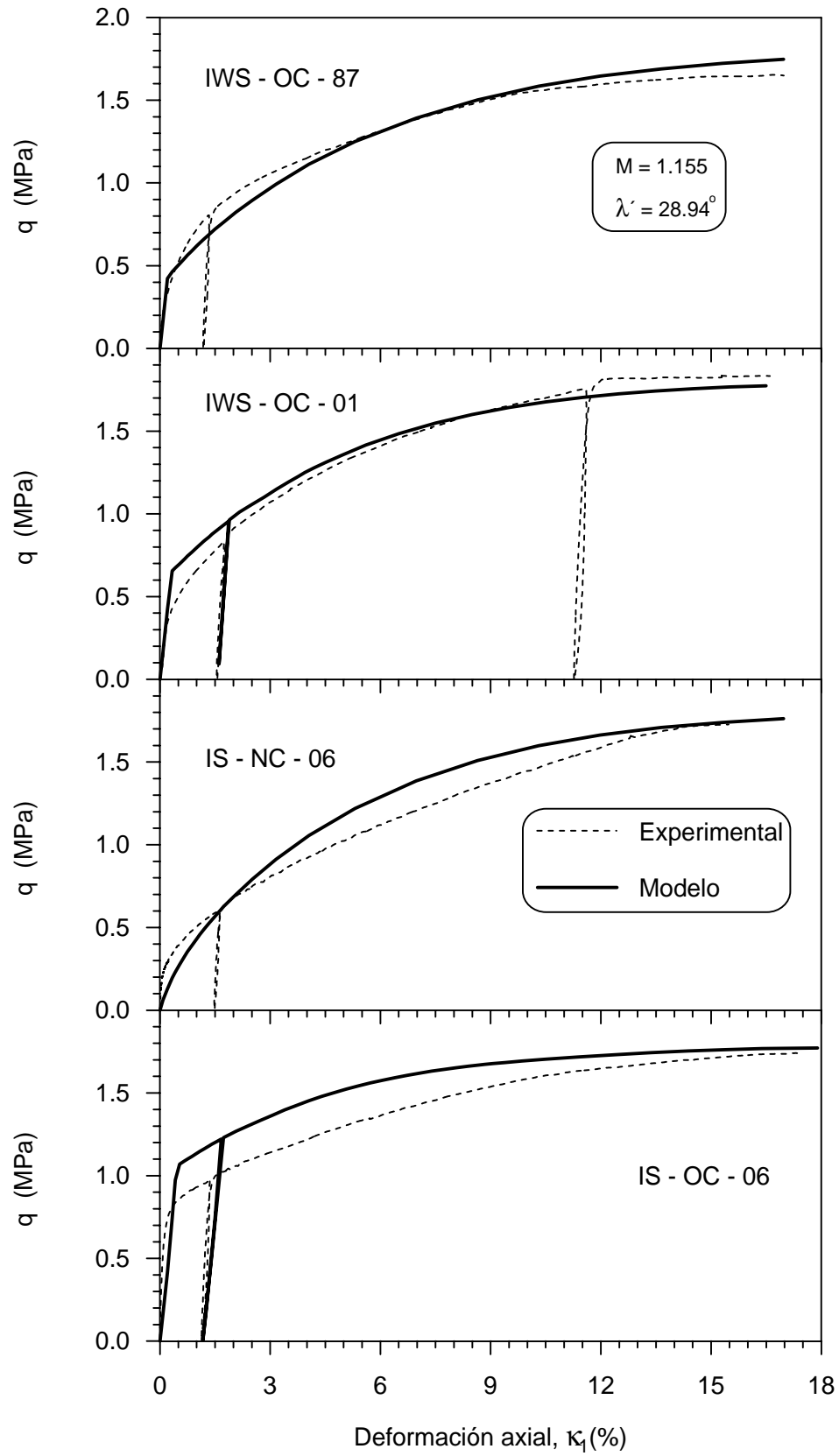


Figura 6.102 Comparación entre resultados experimentales y calculados de la trayectoria de corte.

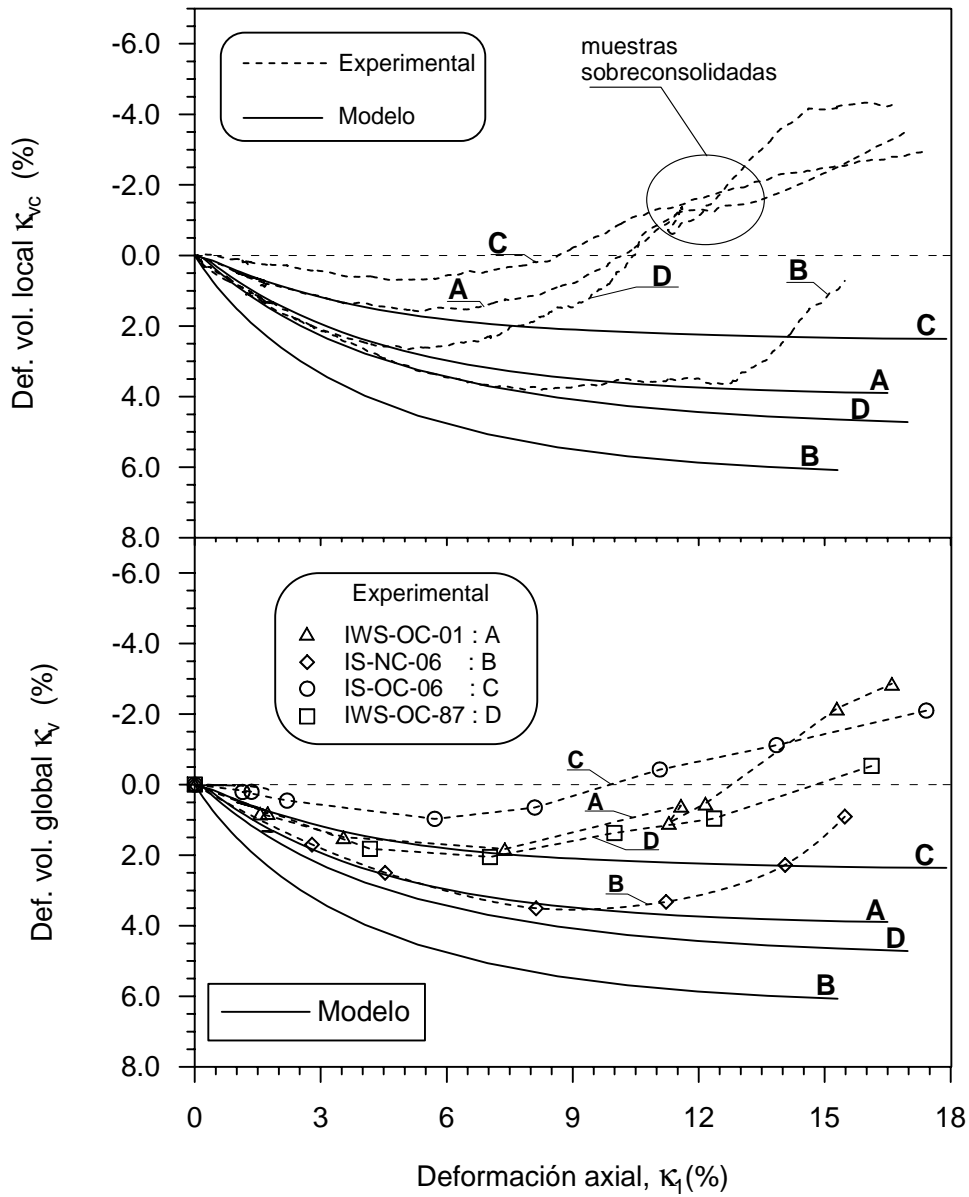


Figura 6.103 Simulación de las deformaciones volumétricas durante la etapa de corte.

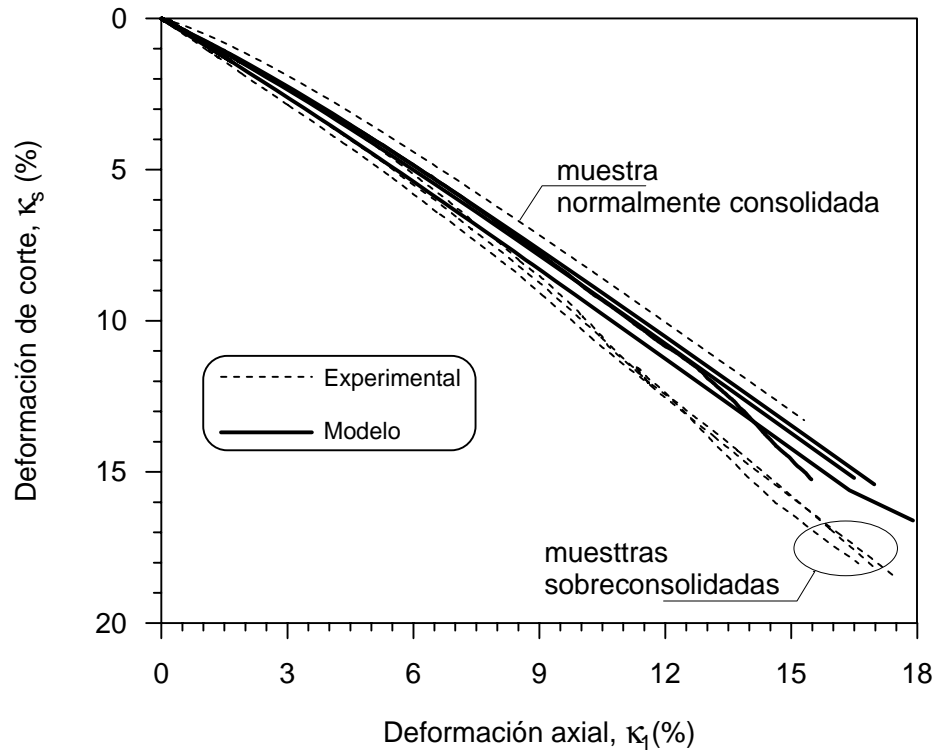


Figura 6.104 Simulación de las deformaciones de corte de los ensayos IS-NC-06, IS-OC-06, IWS-OC-01 y IWS-OC-87.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Resumen y conclusiones

A continuación se resumen las principales conclusiones que se derivan de los trabajos realizados. Estas conclusiones se han dividido en los siguientes grupos:

- a) Características del material ensayado, y de la forma de preparación de las probetas. Resultados de los ensayos convencionales de caracterización
- b) Nuevos equipos y procedimientos de ensayos
- c) Resultados de los ensayos mecánicos con succión controlada

7.1.1 Características del material ensayado

El material ensayado es una arcilla roja de la ciudad de Barcelona que según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, es una arcilla de bajo límite líquido ($w_L = 32 \%$, $w_P = 16 \%$). Su porcentaje de partículas de tamaño arcilloso, limoso y arenoso es del 16.1, 44.5 y 39.4 %, respectivamente.

Se desarrolló un procedimiento para fabricar muestras con una densidad seca y una humedad prefijadas a través de una compactación estática isótropa en el interior de una célula triaxial. Con ello se consiguió probetas de suelo de distintas formas y tamaños, todas ellas con una estructura isótropa y con una historia tensional conocida desde el inicio de su fabricación. Se determinaron las curvas de compactación en el plano Proctor bajo diferentes presiones isótropas, constatándose que la densidad óptima para cada carga se obtiene para grados de saturación más bajos ($S_r = 70 - 75 \%$) que los obtenidos con los métodos de compactación dinámica tradicionales. Esto puede ser debido a la mayor dificultad del aire para salir del suelo cuando la compactación se realiza en el interior de la célula triaxial. Tras la compactación se midió la succión total de cada muestra mediante un psicrómetro de transistores, que permitió dibujar las líneas de igual succión en los ejes del gráfico densidad seca-humedad. Se ha constatado que éstas tienden a ser líneas rectas verticales en los rangos más bajos de humedad y tienden a ser paralelas a las curvas con igual grado de saturación en la zona de humedad igual o superior a la óptima.

Las determinaciones de la succión permitieron trazar las curvas de retención para diversos valores de la porosidad. Ello ha permitido constatar que el efecto de la densidad en la curva de retención se hace nulo para humedades por debajo del 6 % (succión del orden de 4 MPa), lo que permite establecer que el agua ligada a la microestructura es del orden del 40 % para densidades secas de 1.75 g/cm^3 y del orden del 27 % para densidades secas de 1.45 g/cm^3 . En la observación del suelo en microscopio electrónico ambiental se ha constatado la existencia de agregados de partículas arcillosas rodeando a las partículas de limo. El tamaño de estos agregados es en muchos casos comparable al de una partícula de tamaño de limo ($\lambda > 2 \sigma_m$). La porosimetría por intrusión de mercurio ha permitido estimar el tamaño

de poro que separa la porosidad intra e inter-agregados en unos 50 nm. Si se asume que la mayor parte de los poros no intruidos son los de menor diámetro, el volumen de poros intra-agregados que se obtiene es coherente con el derivado a partir de la humedad asociada a la microestructura.

Los ensayos mecánicos objeto de esta investigación se realizaron sobre muestras compactadas con diferentes humedades y densidades secas, pero siempre con humedades por debajo de la humedad óptima de compactación. La fabricación de muestras con humedades superiores al óptimo no se ha abordado dada la dificultad de obtener muestras repetitivas siguiendo el procedimiento de fabricación de probetas que se puso a punto. Por tanto, hay que tener muy presente que los resultados de esta memoria se refieren exclusivamente a muestras del “lado seco” de la curva de compactación.

De forma preliminar a los ensayos que forman el núcleo de este trabajo de investigación se han realizado una serie de ensayos, que se pueden considerar como tradicionales, para acotar el comportamiento de este material:

- 4 Ensayos edométricos de colapso por inundación
- 4 Ensayos edométricos con succión controlada
- 4 Ensayos de compresión isótropa en condiciones saturadas
- 4 Ensayos triaxiales tipo CD en condiciones saturadas

Los ensayos edométricos de colapso por inundación permitieron obtener una idea preliminar de la magnitud del colapso de muestras fabricadas con diversas humedades y densidades iniciales. Los resultados confirman las tendencias ya conocidas, de que la deformación por colapso aumenta al disminuir la densidad seca inicial, y al aumentar la succión inicial del material.

Los ensayos de colapso con control de succión hicieron factible constatar que la deformación de la muestra tras la carga con humedad constante y la inundación posterior de la muestra es parecida a la obtenida tras un proceso de carga a succión constante seguida de una reducción de la succión por escalones. Sin embargo, en los ensayos con succión controlada la deformación durante el proceso de carga ha sido siempre menor que la deformación medida en los ensayos con carga a humedad constante (la reducción de la succión durante el proceso de carga no se controla).

Los ensayos de compresión isótropa en condiciones saturadas propiciaron obtener la “presión de preconsolidación” en condiciones isótropas y saturadas (p_0^*), asociada a diferentes estados del suelo tras la compactación. Por otra parte, en estos ensayos se alcanzó el valor de compresibilidad en condiciones saturadas ($\zeta(0)$ y ρ), que no depende de las condiciones iniciales del suelo. El conocimiento del esfuerzo (presión) isótropo de compactación y la succión inicial, así como de p_0^* , permite conocer dos puntos de la superficie de fluencia inicial del material, que junto con el conocimiento de $\zeta(0)$ y ρ facilitan el ajuste del resto de parámetros que definen la forma de la superficie de fluencia.

Los ensayos de rotura saturados en condiciones drenadas facilitó conocer datos acerca de la pendiente de la envolvente de rotura ($M = 1.15$) y de los módulos elásticos, que se ha comprobado que varían con el nivel de confinamiento. El análisis de las curvas de deformación volumétrica–esfuerzo medio efectivo, y desviador–deformación axial permitió obtener más puntos de la superficie de fluencia del suelo tanto en el plano $p : s$ como $p : q$.

Esta serie de ensayos preliminares también permitieron encontrar parámetros que rigen el comportamiento del suelo en condiciones saturadas, como el coeficiente de consolidación y la permeabilidad del material a diferentes estados de densidad.

7.1.2 Equipo de laboratorio desarrollado

En el laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC se ha trabajado desde hace tiempo con equipos edométricos y triaxiales con succión controlada (Josa, 1988; Balmaceda, 1991; Yuk Gehling, 1994; Romero, 1999; Carvalho, 2002). Parte de estos equipos se han utilizado en los ensayos preliminares de caracterización, sin embargo, como nueva aportación durante el desarrollo de la presente memoria se desarrolló una nueva célula edométrica y se ha acabado la puesta a punto del equipo triaxial utilizado por Romero (1999) para poder realizar ensayos de rotura a compresión triaxial con succión controlada.

La nueva célula edométrica desarrollada presenta las siguientes características innovadoras respecto a las células tradicionales:

- 4 Alta rigidez frente a cambios de esfuerzo vertical
- 4 Posibilidad de aplicar succiones mediante la técnica de traslación de ejes (rango de 0 a 1.5 MPa), o mediante control de humedad relativa del aire (rango entre 4 y 500 MPa). Hay que señalar que esta última opción no se utilizó en el desarrollo de este trabajo
- 4 Aplicación neumática de la carga, que permite opcionalmente la aplicación de presiones verticales hasta el doble de la presión máxima del sistema de aire comprimido

El equipo edométrico facilita medir muy pequeños cambios de volumen (resolución del orden del 0.01 %). Sin embargo, presenta la limitación asociada con el desconocimiento del valor de los esfuerzos horizontales, lo que hace difícil la interpretación de los ensayos en el marco de un modelo constitutivo basado en la relación entre el esfuerzo medio y las deformaciones.

Con relación al equipo triaxial, se acabó de poner a punto el sistema automático de control de registro del esfuerzo desviador (a través de una minicélula de carga y un sistema de aplicación hidráulica de presión), que por otra parte permite realizar ensayos con control de la velocidad de deformación. La puesta a punto del equipo supuso la necesidad de realizar la calibración de los diversos sistemas de medida entre los que cabe destacar el sistema láser de medida de la deformación radial. Este sistema permite la medida continua de la deformación radial en un punto de la probeta y la realización de perfiles de deformación a lo largo de la altura de la muestra cada cierto tiempo. Estas últimas medidas permiten evaluar el cambio de volumen global de la probeta. Hay que señalar que la robustez del equipo utilizado junto con el empleo de piedras porosas de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa) ha permitido la realización de ensayos con un rango de succión que supera el MPa, lo que no resulta habitual en este tipo de equipos.

7.1.3 Resultados de los ensayos mecánicos con succión controlada

a) Ensayos edométricos

Se han realizado ensayos sobre muestras compactadas con diversas humedades y carga isotrópica de compactación. En los ensayos se siguieron trayectorias de aumento de carga y disminución de succión (análogas a las de los ensayos de colapso) seguidas de trayectorias de secado, ciclos de carga y descarga a succión constante, reducción de la succión y nuevo ciclo de carga y descarga bajo la succión mínima aplicada en la primera reducción de succión. La forma de esta trayectoria se eligió para permitir estudiar el comportamiento del suelo en ciclos de carga–descarga y de humedecimiento–secado tanto en régimen elástico como elastoplástico. Por otra parte, la trayectoria seguida permite fijar la posición de la superficie de fluencia y obtener posteriormente un nuevo punto de cruce de esta superficie. Pese a la dificultad que entraña el desconocimiento de los esfuerzos horizontales se ha comprobado que el suelo sigue de forma cualitativa lo establecido en el modelo BBM.

Hay que resaltar que las deformaciones volumétricas de colapso se concentran en el rango de succión más bajo mientras que en los rangos altos de succión las deformaciones al reducir la succión son muy bajas. Este hecho indica que la pendiente de la curva LC tiende a hacerse vertical para succiones por encima de unos 0.2 MPa. Por otra parte, por encima de estas succiones los cambios de volumen de agua son muy pequeños.

El acoplamiento entre los fenómenos mecánicos e hidráulicos se ha manifestado a través de los gráficos de tipo SWEP. En estos gráficos puede comprobarse que los cambios de volumen de poros (Δe) y de volumen de agua (Δe_w) siguen diferentes pautas según el tipo de acción aplicada sobre el suelo y el estado del mismo. En trayectorias de colapso se observa cómo una vez que se entra en régimen de deformaciones plásticas las trayectorias seguidas sobre el plano $e_w : e$ tienden a ser perpendiculares a las líneas de igual grado de saturación (e_w/e). En las trayectorias de carga se observa reducción del volumen de agua (e_w) asociadas con las disminuciones de volumen de poros (e), que tienden a seguir un grado de saturación (e_w/e) aproximadamente constante en el rango elástico. Cuando el suelo se plastifica en estas trayectorias de carga, el grado de saturación suele presentar un aumento considerable. Las trayectorias de descarga finales tienden a ser paralelas a las líneas de grado de saturación (e aumenta y entra agua en el suelo), mientras que las trayectorias de secado y posterior humedecimiento tienden a ser horizontales (casi no se observa cambio de volumen mientras entra o sale agua).

b) Ensayos con estado de carga isotrópico y succión controlada

En estos ensayos se siguieron trayectorias análogas a los ensayos edométricos, pero manteniendo estados de carga isotrópicos, lo que permitió controlar el estado de esfuerzos del suelo. Estos ensayos se han realizado en dos tipos de equipos.

En primer lugar se utilizó una mini-célula donde el cambio de volumen de una probeta de dimensiones muy reducidas se medía a través de la cantidad de agua que entraba o salía de la célula cuyas paredes eran muy rígidas. Las pequeñas dimensiones de la probeta ($\lambda = 20$ mm, $h = 20$ mm) se eligieron para minimizar el tiempo de equilibrado tras los cambios de carga o succión. Las reducidas dimensiones de

las probetas limitaron la resolución del sistema de medida de los cambios de volumen del suelo en $\kappa = 0.3 \%$. Esta resolución dificultó obtener resultados óptimos en el caso de tener muestras rígidas en estado sobreconsolidado.

El segundo tipo de ensayo con carga isotrópica se realizó en la célula triaxial con succión controlada, cuyo equipo presenta una mejor resolución en la medida de los cambios de volumen pero con tiempos de equilibrado de succión del orden de 15 días. Por otra parte, en este equipo se pueden medir de forma diferenciada la deformación vertical y radial.

Los resultados de estos ensayos interpretados en términos de cambios de volumen siguen las pautas establecidas por el modelo BBM y permiten obtener los parámetros del mismo de forma fiable, especialmente en los ensayos realizados en el triaxial. Sin embargo, hay que indicar que en las trayectorias de humedecimiento bajo cargas inferiores a la de compactación realizadas en la mini-célula isotrópica, las deformaciones de colapso han aparecido a succiones más altas que las predichas por el modelo. En el resto de los ensayos, las pautas de cruce de la superficie de fluencia han resultado estar de acuerdo con las predicciones de dicho modelo.

Por otra parte se onstató nuevamente un fuerte acoplamiento entre las deformaciones y los cambios de humedad. En trayectorias de reducción de succión se ha observado un cambio brusco de pendiente en la relación $e_w : \ln(u_a - u_w)$ cuando el suelo empieza a colapsar. Este cambio de pendiente también se observa en la relación $e_w : \ln(\omega_m - u_a)$ cuando se supera la presión de preconsolidación.

Las deformaciones y los cambios de humedad medidos en los dos tipos de células fueron similares, salvo en lo referente a la primera etapa de aumento de carga isotrópica, donde las deformaciones medidas en la mini-célula isotrópica han sido mucho mayores que las medidas en el equipo triaxial. Esta discrepancia puede explicarse por los problemas de acoplamiento entre los diferentes elementos y por la compresibilidad del sistema de medida debido a la existencia de aire, a pesar de la etapa de desaeración inicial. Sin embargo, en lo relativo a la medida del volumen de agua en la muestra hay que señalar que en todos los ensayos las discrepancias entre los valores de la humedad final medida en el horno y la medida en los ensayos han sido muy pequeñas.

En los ensayos triaxiales se constata que en las trayectorias de colapso la deformación ha sido isotrópica. En las trayectorias de aumento de carga de confinamiento las deformaciones fueron fundamentalmente isotrópicas, aunque en algunos ensayos se midieron pequeñas discrepancias entre las deformaciones axiales y radiales.

c) *Ensayos de compresión triaxial*

Se han llevado a cabo ensayos de compresión triaxial con distintos valores de succión, y en muestras con diversas historias de esfuerzos y succión. Además de los ensayos en condiciones saturadas, se hicieron ensayos con varios niveles de succión a fin de obtener el efecto de la misma sobre la resistencia y rigidez del suelo. Ello permitió comprobar que la pendiente de la envolvente de rotura cambia poco con la succión. Para el rango de succiones empleado puede decirse que la cohesión aparente del suelo varía linealmente con la succión.

A través de las curvas deformación axial–desviador se logró el valor de los módulos elásticos del suelo en diferentes rangos de succión y nivel de confinamiento. En las mismas curvas se detectaron los puntos de plastificación en las muestras sobreconsolidadas y se comprobó que estos puntos son coherentes con los obtenidos a partir de las curvas deformación volumétrica–presión media durante la fase de corte.

Se ensayaron muestras sobreconsolidadas a través de acciones mecánicas e hidráulicas. En el primer caso se ha realizado un ciclo de carga–descarga en términos de esfuerzo medio de confinamiento; y en el segundo dos procedimientos alternativos: a) siguiendo una trayectoria de secado-humedecimiento, que ha originado sobre la muestra una deformación irre recuperable por retracción debida al fuerte incremento de la succión; y b) siguiendo una trayectoria de humedecimiento-secado con el desarrollo de deformaciones irre recuperables de colapso.

Los resultados de las tres muestras junto con las ensayadas en condiciones normalmente consolidadas han seguido las previsiones del modelo BBM. Los puntos de la superficie de fluencia al analizar las curvas deformación axial–desviador confirman, en los tres casos mencionados, rigidización por las deformaciones plásticas producidas por los diversos mecanismos. La deformación volumétrica durante la fase de corte presenta una fase inicial contractante seguida de una fase final con una dilatancia más o menos marcada según se trate de muestras con un cierto grado de sobreconsolidación o normalmente consolidadas. Hay que señalar que se han registrado aumentos de volumen en muestras normalmente consolidadas en deformaciones axiales por encima del 15 %. Este tipo de fenómeno no es compatible con el modelo elastoplástico que se ha utilizado como referencia. Sin embargo hay que tener presente que para esos altos niveles de deformación axial pueden aparecer errores en la medida de los cambios de volumen (por ejemplo, debido a la aparición de pequeños pliegues en la membrana de látex).

Se ha observado sistemáticamente que durante la fase de corte se produce expulsión de agua; no obstante, el cambio de humedad se vuelve muy pequeño a partir de cuando comienza la fase dilatante. En la fase contractante, en general se observan aumentos en el grado de saturación (el suelo disminuye un volumen mayor a la del agua que sale del mismo). Por otro lado, la fase dilatante se desarrolla con la disminución del grado de saturación.

Las líneas de estado crítico (en el plano $v : \ln(\omega_n - u_a)$) para diferentes succiones presentan pendientes algo diferentes, que es mayor en el caso de la succión elevada.

7.2 Líneas futuras de investigación

El trabajo puede complementarse ampliando el campo objeto de estudio y, por otra parte, abriendo nuevas líneas de trabajo como consecuencia de alguno de los resultados obtenidos.

Como ampliación del objeto de estudio debe contemplarse la ejecución de ensayos sobre muestras del mismo suelo compactadas con una humedad por encima de la del óptimo. Ello permitiría constatar si la estructura creada en esas condiciones tiene un comportamiento que pueda o no explicarse con el mismo modelo y los mismos parámetros derivados de los ensayos realizados sobre muestras compactadas del lado seco.

Otra posible aplicación del trabajo sería el estudio de la anisotropía y su posible borrado en trayectorias de humedecimiento, secado y carga. Las muestras se fabricarían con un proceso de compactación anisótropo con control de esfuerzos, de desplazamiento o combinado.

Desde el punto de vista de la utilización de los medios experimentales, las técnicas de ensayo desarrolladas podrían mejorarse, encausándolas al desarrollo de un sistema edométrico con medida de los esfuerzos laterales, ya sea con posibilidad de compensación radial o pasivo. Este equipo permitiría ampliar el conocimiento de la evolución de K_0 con la succión.

Con respecto al equipo triaxial, una posible mejora sería la aplicación de la succión mediante flujo de aire húmedo. Ello permitiría ensayar muestras arcillosas en un rango más alto de succión y realizar los ciclos de secado intenso y humedecimiento dentro de la célula. Asimismo, la incorporación de sistemas piezoeléctricos (bender-element) situados en los cabezales de la muestra haría factible detectar los cambios de rigidez del suelo con la succión. Por otra parte, la utilización de tensiómetros de alta capacidad permitirían elevar la velocidad de deformación-carga, tendiendo hacia la realización de ensayos en condiciones “no drenadas”. Finalmente, podría avanzarse en la automatización del proceso de medida de las deformaciones radiales mediante motores paso a paso controlados por el ordenador.

En relación con el tipo de ensayo realizado, el equipo triaxial puesto a punto permite trayectorias más generales que las de en esta memoria. Por ejemplo, la ejecución de ensayos de reducción de succión (colapso) mediante la aplicación de un desviador permitiría obtener pautas de la superficie de fluencia de forma alternativa a la empleada en este trabajo.

El efecto de la sobreconsolidación por aumento de la succión sólo se ha estudiado en un ensayo, por lo que sería interesante realizar más ensayos de este tipo, y profundizar en el análisis de la superficie de fluencia de incremento de succión.

El análisis más detallado de los resultados de los ensayos puede ayudar a la mejora de los modelos constitutivos existentes, y en especial profundizar tanto desde el punto de vista experimental (con nuevos ensayos si es el caso), como de modelación en el análisis del comportamiento dilatante observado en la fase final de los ensayos de corte.

Por último, los resultados de los ensayos analizados en términos de acoplamiento entre deformación y cambio de volumen de agua, pueden ser de utilidad para el desarrollo de nuevos modelos, que tengan en cuenta el acoplamiento a nivel constitutivo entre los aspectos puramente mecánicos (esfuerzo-deformación), e hidráulicos (succión / cambio de humedad).

REFERENCIAS

- Abdrabbo, F.M., El Hansy R.M., and Hamed, K.M. (2000). Collapsibility on Egyptian loess soil. In H. Rahardjo, D.G. Toll and E.C. Leong (eds.) Proc. Of the Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, Rotterdam, Balkema: 595-600.
- Abe, H. and Kawakami, H. (1987). Negative pore water pressure and collapse phenomena in unsaturated soils. Proc. of Symp. Engrg. Characteristic of Unsaturated Soils, Japanese Soc. of SMFE: 45-54.
- Adams, B.A., Wulfsohn, D. and Fredlund, D.G. (1996). Air volume change measurement in unsaturated soil testing using a digital pressure-volume controller. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 19(1): 12-21.
- Aitchison, G.D. and Bishop, A.W. (1960). Discussion in Pore pressure and suction in soil. 150. London: Butterworths.
- Aitchison, G.D. (1965). Discussion in Proc. 6th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 3, Montreal: 318-321.
- Aitchison, G.D. & Woodburn, J.A. (1969). Soil suction foundation design. Proc. 7th I.C.S.M.F.E., México, Vol. 2: 1-8.
- Alonso, E.E., Gens, A., and Hight, D.W. (1987) Special problem soils. General report. In proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 3: 1087-1146.
- Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique 40, No. 3: 405-430.
- Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. (1992). Modelling the behaviour of compacted soil upon wetting. Raúl Marsal Volume, S.M.M.S., México: 207-223
- Alonso, E.E. (1993). Constitutive modelling of unsaturated soils. Civil Engineering European Course, Programme of Continuing Education. UPC.
- Alonso, E.E., Gens, A. and Yuk Gehling, W.Y. (1994). Elastoplastic model for unsaturated expansive soils. Proc. 3rd European Conf. On Numerical Methods in Geotech. Engrg. Manchester. I. Smith (ed.), Balkema: 11-18.
- Alpan, I. (1957). An apparatus for measuring the swelling pressure in expansive soils. Proc. 4th Conf. On Soils Mechanics Session 5: 5.1-5.60.
- Anderson, W.F., Goodwin, A.K., Pyrah, I.C. and Salman, T.H. (1997). Equipment for one-dimensional compression and triaxial testing of unsaturated granular soils at low stress levels. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 20 (1): 74-89.
- ASTM STP 977, (1988). Advanced triaxial testing of soils and rock. ASTM Publication, Philadelphia.
- Balmaceda, A.R. (1991). Suelos compactados. Un estudio teórico y experimental. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Barden, L. (1965). Consolidation of compacted and unsaturated clays. Géotechnique, 15 (3): 267-286.
- Barden, L. Madedor, A.O. y Sides, G.R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clays. J. Soil Mech. Found. Div. A.S.C.E. 95, SM1: 33-51.
- Barden, L. & Sides, G.R. (1970). Engineering behaviour and structure of compacted clay. J. SMFE, ASCE, 96, (SM4): 1171-1201.
- Barrera, M., Lloret, A., Vaunat, J. & Gens, A. (1998). Análisis teórico y experimental del efecto de la carga de compactación en los cambios de volumen de un suelo. XI Congreso Brasileño de Mecánica de Suelos en Ingeniería Geotécnica, COBRAMSEG, Brasilia Vol. 3: 835-842.
- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A. & Gens, A. (2000). Collapse test on isotropic and anisotropic compacted soils. International Workshop On Unsaturated Soils: Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Trento, Italy. A.A. Balkema, Rotterdam: 33-45.
- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A. & Vaunat, J. (2002). Hydro-mechanical behaviour of a clayey silt during controlled-suction shearing. International Conference on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, A. A. Balkema, Rotterdam Vol. 2: 485-490.

- Bishop, A.W and Eldin, G. (1950). Undrained triaxial test on saturated sand and their significant in the general theory of shear strength. *Géotechnique*, Vol. 2: 12-22.
- Bishop, A.W. (1959). The principle of effective stress. *Teknik Ukeblad*, 39: 859-863.
- Bishop, A.W., Alpan, I., Blight, G.E. and Donald, I.B. (1960). Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. *Res. Conf. on Strength of Cohesive Soils*, Boulder: 503-532.
- Bishop, A.W. (1961). The measurement of pore pressure in the triaxial test. *Pore Pressure and Suction in Soils Conference*, Butterworths, London.
- Bishop, A.W. and Donald, I.B. (1961). The experimental study of partly saturated soil in triaxial apparatus. In *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris. Vol. 1: 13-21
- Bishop, A.W. and Henkel, D. J. (1962). *The measurement of soil properties in the triaxial test*. Edward Arnold, London.
- Bishop, A.W. y Blight, G.E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils. *Géotechnique* 13, No 3: 177-197.
- Bishop, A.W. and Wesley, L. D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Géotechnique*, 25 (4): 657-670
- Blight, G.E. (1965). A study of effective stress for volume change, in *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*. Sidney Butterworths: 259-269.
- Blight, G.E. (1967). Effective stress evaluation of unsaturated soils. *Proc. Of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 93.
- Bocking, K.A. and Fredlund, D.G. (1980). Limitations of the axis translation technique. *Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils*, Denver, Colorado, Vol. 1: 117-135.
- Booth, A.R. (1975). The factors influencing collapse settlement in compacted soils. *Proc. 6th Reg. Conf. for Africa on S.M.F.E.*, Durban, Vol. 1: 57-63.
- Booth A.R. (1977). *Collapse Settlement in Compacted Soils*. CSIR Research Report 324, NITRR Bulletin 13, Pretoria, South Africa.
- Brackley, I.J.A. (1973). Swell pressure and free swell in compacted clay. *Proc. 3th I.C.E.S. Haifa, Israel*, Vol. 1: 169-176.
- Brackley, I.J.A. (1975). A model of unsaturated clay structure and its application to swell behaviour. *6th Reg. Conf. for Africa on SMFE*, Durban, Vol. 1: 71-78.
- Brull, A. (1980). *Caracteristiques Mechaniques des sols de fondation de Chaussées en fonction de leur état d'humidité et compacité*. *Int. Conf. Compaction*, Paris, 1 : 113-118.
- Burland, J.B. (1965). Some aspects of mechanical behaviour of partly saturated soils, in *Moisture equilibria and moisture change in soil beneath covered areas*”, Sidney: Butterworths: 270-278.
- Burland, J.B. and Symes, M.J. (1982). A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus. *Géotechnique*, 32 (1): 62-65.
- Carvalho, L.C. (2001). *Estudio experimental del comportamiento mecánico de un suelo cementado no saturado*. Ph.D. Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chang, R.K. (1969). Pressure plate apparatus for volumetric measurement of suction, swelling pressure and consolidation in clay soils. *Canadian Geotechnical J.*, Vol. 6. No. 2: 209-212.
- Charles, W.W. Ng, and Abraham, C.F. Chiu, (2001). Behaviour of a loosely compacted unsaturated volcanic soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 12 : 1027-1036.
- Clayton, C.R.I. and Khatrush, S.A. (1986). A new device for measuring local axial strain on triaxial specimens. *Géotechnique*, 36(4): 593-597.
- Clayton, C.R.I., Khatrush, S.A., Bica, A. And Siddique, A. (1989). The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 12 (1): 69-76.
- Cole, D.M. (1978). A technique for measuring radial deformation during repeated load triaxial testing. *Can. Geotech. J.*, 15 : 426-429.
- Coleman, J.D. (1962). Stress strain relations for partly saturated soils. *Correspondence. Géotechnique* 12, No 4: 348-350.

- Cox, D.W. (1978). Volume change of compacted clay fill. Clay fill, London, ICE: 79-86.
- Croney, D., Coleman, J.D. and Bridge, P.M. (1952). The suction of moisture held in soil and other porous materials. Road Research Technical Paper No. 24, London.
- Croney, D., Coleman, J.D. and Black, W.P.M. (1958). Studies of the movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. HRB spec. Washington D.C. Report 40: 226-25.
- Cruz, S. (1996). Assaig del sòl no saturat sota càrrega isòtropa i succió controlada. Desenvolupament d'un equip d'assaig i modelització numèrica. Msc Tesis, Universidad Politècnica de Catalunya.
- Cuccovillo, T. and Coop, M.R. (1997). The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs. *Géotechnique*, 47 (1): 167-171.
- Cuellar, V. (1978). Análisis de los métodos existentes para el empleo de arcillas expansivas en obras de carreteras y recomendaciones sobre las técnicas más idóneas para su uso habitual en España. Laboratorio de Transporte y Mecánica de Suelos, Madrid: 321.
- Cui, Y. And Delage, P. (1996). Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique*, 46 (2): 291-311.
- Das, B.M. (1983b). Advanced soil mechanics. Hemisphere Publishing Corporation, Washington.
- Davies, P. (1975). Creep characteristics of three undisturbed clays. PhD Thesis, University of London.
- Delage, P. and Lefebvre, G. (1984). Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 21: 21-35.
- Delage, P., Suraj de Silva, G.P.R. De Laure, E. (1987). Un nouvel appareil triaxial pour les sols non-satures. In Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 1: 25-28
- Delage, P., Howat, M.D. & Cui, Y.J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. *Engineering Geology*, 50: 31-48.
- Delgado A. (1986). Influencia de las trayectorias de las tensiones de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Di Mariano, A., Airò Farulla, C. and Valore, C. (2000). Retention curves and 1-D behaviour of a compacted tectonised unsaturated clay. International Workshop On Unsaturated Soils: Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Trento, Italy. A.A. Balkema, Rotterdam: 33-45.
- Diamond, S. (1970). Pore size distributions in clay. *Clays and Clay Minerals*, 18: 7-23.
- Dimos, A. (1991). Measurent of soil suction using transistor pycrometer. VICROADS Internal Report No IR/91-3.
- Dineen, K. (1997). The influence of soil suction on compressibility and swelling. PhD Thesis, University of London.
- Drumright, E. (1987). Shear strength for unsaturated soils. Ph.D. Thesis, University of Colorado. Fort Collins.
- Dudley, A. (1970). Review of collapsing soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. Of the American Society of Civil Engineer.*
- Edil, T.B., Motan, E.S. and Toha, F.X. (1981). Mechanical behaviour and testing method of unsaturated soils. *Laboratory Shear Strength of Soil. ASTM STP40*: 114-129.
- Edil, T.B. and Motan, E.S. (1984). Laboratory evaluation of soil suction components. *Geot. Test. J.*, Vol. 7, No. 4: 173-181.
- El-Hosri, M.S., Biarez, J. and Hicher, P.Y. (1981). Dynamic triaxial and vibratory in-situ behaviour of cohesive soils. *Proc. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, 2: 585-590.
- Escario, V. (1965). International panel review engineering effects of moisture changes in soils. 1st International Research and Engineering Conference, Texas: 24-25.
- Escario, V. (1967). Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension. *Int. Cooperative Research on the Prediction of Moisture Content under Roads Pavements*, O.C.D.E., Madrid-Metting.
- Escario, V. (1969a). Determination of Geotechnical characteristics of expansive soils. *Proc. Of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils*, Texas: 114-120.

- Escario, V. (1969b). Swelling of soils in contact with water at a negative pressure. Proc. Of the 2nd International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas: 207-217.
- Escario, V. and Sáez, J. (1973). Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction. Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils, Haifa: 196-200.
- Escario, V. (1980). Suction controlled penetration and shear test. In Proceedings of the 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, Vol. 2: 781-797.
- Escario, V. and Sáez, J. (1986). The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique* 36, No. 3: 453-456.
- Escario, V. and Sáez, J. (1987). The shear strength under high suction values. Written discussion. Session 5, Proc. 9th European Conf. On Soil Mech. And Fdn. Eng., Vol. 3. Balkema, Dublin: 1157.
- Escario, V. and Juca, J.F.T. (1989). Strength and deformation of partly saturated soils. Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 1: 43-46.
- Fredlund, D.G. (1975). A diffused air volume indicator of soils under high suction values. Written discussion. Session 5, Proc. 9th European Conf. On Soil Mech. and Fdn. Eng., Vol. 3. Balkema, Dublin: 1157.
- Fredlund, D.G. y Morgenstern, N.R. (1976). Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 13, No 3: 261-276.
- Fredlund, D.G. y Morgenstern, N.R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *J. Geotech. Div. A.S.C.E.* 103, GT5: 447-466.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal.* 15, No. 3: 313-321.
- Fredlund, D.G. (1979). Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 16 No 1: 121-139.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1985). Theoretical context for understanding unsaturated residual soil behaviour. Proc. 1st Int. Conf. on Geomech. in Tropical, Lateritic and Saprolitic, Brasilia, 1: 295-306.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. and Gan, J.K.M. (1987). Nonlinearity of strength envelope for unsaturated soils. Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils, New Delhi: 49-54.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils.* John Wiley & Sons, INC., New York.
- Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., and Barbour, S.L. (1996). The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal.* 33: 440-448.
- Fung, Y.C. (1965). *Foundations of solid mechanics.* Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Fung, Y.C. (1969). *A first course in continuum mechanics.* Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Gan, J.K.M., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, 25: 500-510.
- Gardner, W.R. (1956). Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. soc. Am. Proc.*, 20 : 317-320.
- Geiser, F., Laloui, L., and Vulliet, L. (1998). Yielding of a remoulded sandy silt in saturated and unsaturated states. In Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soil, Beijing, Vol. 1: 47-53.
- Geiser, F., Laloui, L., and Vulliet, L. (2000). On the volume measurement in unsaturated triaxial test. In H. Rahardjo, D.G. Toll & E.C. Leong, Proc. Of the Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, Rotterdam / Balkema: 669-674.
- Gens, A. and Potts, D.M. (1982a). A theoretical model for describing the behaviour of soils not obeying Rendulic's principle. Proc. 1st Int. Symp. Num. Mod. Geomech., Zurich: 24-32.
- Gens, A. Alonso, E.E. and Josa, A. (1989). Elasto-plastic modelling of partially saturated soils. Proc. of NUMOG III, edited by Pietruszczak, S. and Pande, G.N.: 163-170.
- Gens, A. and Alonso, E.E. (1992). A framework for behaviour of unsaturated expansive soils. *Canad. Geotech. Jnl.* 29: 1013-1032.
- Gens, A. (1993). Constitutive modelling of expansive soils. *Unsaturated soils: Recent developments and applications.* Civil Engineering Courses, Barcelona.
- Gens, A. (1995). Constitutive modelling. Application to compacted soils. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, 1995.

- Gens, A., Alonso, E.E., Suriol, J. & Lloret, A. (1995). Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil. Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 1: 83-88.
- Gens, A. & Romero, E. (2000). Ensayos de laboratorio. Simposio sobre geotécnica de las infraestructuras del transporte. Barcelona: 17-43
- Gibbs, H.J., Hilf, J.W., Holtz, W.G. and Walker, F.C. (1960). The strength of cohesive soils. Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado: 33-162.
- Gili, J. A. (1988). Modelo microestructural para medios granulares no saturados. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, U.P.C., Tesis Doctoral, Barcelona.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S. and Sato, T. (1991). A simple gauge for local small strain measurement in the laboratory. Soils and Foundations, 31 (1): 169-180.
- Griffiths, F.J. and Joshi, R.C. (1989). Change in pore size distribution due to consolidation of clays. Géotechnique, 39 (1): 159-167.
- Gromko, G.J. (1974). Review of expansive soils. Journal of the Geot. Eng. Div. A.S.C.E., Vol. 100 GT6: 667-6687.
- Gulhati, S.K. and Satija, B.S. (1981). Shear strength of partially saturated soils. Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech., Stockholm 1: 609-612.
- Habib, S.A. (1995). Lateral pressure of unsaturated expansive clay in looped stress path. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. E.E. Alonso and P. Delage, Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 1: 95-100.
- Habib, S.A., Kato, T. & Karube, D. (1995). Suction controlled one dimensional swelling and consolidation behaviour of expansive soil. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. E.E. Alonso and P. Delage, Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 1:101-107.
- Harrison, B.A. and Blight, G.E. (2000). A comparison of in-situ soil suction measurements. In H. Rahardjo, D.G. Toll and E.C. Leong (eds.) Proc. Of the Asian Conf. on Unsaturated soils, Singapore, Rotterdam, Balkema: 281-285.
- Hecht, E. (1987). Optics. Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts, 2nd ed.
- Henkel, D.J. (1960). The relationships between the effective stresses and water content in saturated clays. Géotechnique, Vol. 10 No. 2
- Hilf, J.W. (1956). An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. PhD Thesis. Technical Memo No. 654, United States Bureau of Reclamation, Denver.
- Hillel, D. (1971). Soil and water: Physical principles and processes. Academic Press, New York.
- Hird, C.C. and Yung, P.C.Y. (1987). Discussion. Géotechnique, 37 (3): 413-414.
- Hird, C.C. and Yung, P.C.Y. (1989). The use of proximity transducers for local strain measurement in triaxial tests. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 12, No. 4: 292-296.
- Ho, D. And Fredlund, D.G. (1982). Strain rates for unsaturated soil shear strength testing. Proc. 7th South-east Asian Geotech. Conf., Hong Kong: 787-803.
- Holtz, W.G. (1959). Expansive clays-properties and problem. Quarterly of the Colorado School of Mines, Vol. 54, No. 4: 89-125.
- Holubec, I. (1966). The yielding of cohesionless soils. Ph.D. Thesis, University of Waterloo.
- Hoque, E., Sato, T. And Tatsuoka, F. (1997). Performance evaluation of LDTs for use in triaxial tests. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, 20 (2): 149-167.
- Houlsby, G.T. (1997). The work input to an unsaturated granular material. Géotechnique 47 (1): 193-196.
- Houston, W.N., Mahmoud, H.H. and Houston, S.L. (1995). A laboratory procedure for partial-wetting collapse determination. In S.L. Houston and W.K. Wray (eds.) Unsaturated Soils Geotechnical Special Publications, ASCE, No 39, Dallas: 54-63.
- Houston, S.L., Mahmoud, H.H. and Houston, W.N. (1995). Down-hole collapse test system. J. Geotech. Engrg., ASCE, 121(4): 341-349.
- Jaky, J. (1948). Pressure in silos. Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. And Fdn. Engng. 1: 103-107.
- Jardine, R.J., Symes, M.J., and Burland, J.B. (1984). The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. Géotechnique, 34 (3): 323-340. Géotechnique 12, No 2: 125-144

- Jenning, J.E.B. and Burland, J.B. (1962). Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. *Géotechnique* 12, No 2: 125-144.
- Jenning, J. and Knight, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. Sixth Reg. Conf. for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa.
- Jiménez Salas, J.A., Justo, J.L., Romana, M. y Faraco, C. (1973). The collapse of gypseus silts and clays of low plasticity in arid and semiarid climates. Proc. 8th I.C.S.M.F.E., Moscú : 161-190.
- Jiménez Salas, J.A. y Justo, J.L. (1975). Propiedades de los suelos y de las rocas. *Geotecnia y Cimentaciones I*, Editorial Rueda, Madrid.
- Josa, A., Alonso, E.E., Lloret, A. and A. Gens (1987). Stress-strain behaviour of partially saturated soils. Proc. 9th ECSCMFE, Dublin: 561-564.
- Josa, A. (1988). Un modelo elastoplástico para suelos no saturados. Ph.D. Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Jucá, J.F.T. and Frydman, S. (1996). Experimental technique. State of the art report. Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema 7 Presses des Ponts et Chaussées, 3: 1257-1292.
- Justo, J.L., Delgado, A. and Ruiz, J. (1984). The influence of stress-path in the collapse-swelling of soils at the laboratory. Proc. 5th Int. Conf. Expansive Soils, Adelaide: 67-71.
- Kaczmarek, M. and Hueckel, T. (1998). Use of porosity in models of consolidation. *J. Engrg. Mechanics ASCE* 124 (2): 237-239.
- Karube, D. (1983). Effect of suction on soil behaviour. Proc. 7th Asian Reg. Onf. on S.M.F.E., Haifa, Vol. 1: 30-35.
- Kassif, G. and Ben Shalom, A. (1970). Apparatus for measuring swell potential under controller moisture intake. *ASTM, Journal of Materials*, Vol. 5, No. 4: 3-15.
- Kassif, G. and Ben Shalom, A. (1971). Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique*, Vol. 21, No. 3: 245-255.
- Kato, S., Matsuoka, H. and Sun, D.A. (1995). A constitutive model for unsaturated soil based on extended SMP. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, 2: 739-744.
- Kato, S. and Kawai, K. (2000). Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state. *Soils and Foundations* 40(5): 75-90.
- Khan, A.H. and Hoag, D.L. (1979). A non-contacting transducer for measurement of lateral strains. *Can. J.*, 16: 409-411.
- Kolybas, D. and Wu, W. (1989). A device for lateral strain measurement in triaxial tests with unsaturated specimens. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, 12 (3): 227-229.
- Komornik, A., Livneh, M. and Smucha, S. (1980). Shear strength and swelling of clays under suction. Proc. Of the 4th Int. Conf. on Expansive Soils, Denver, Colorado: 206-226.
- Kunze, R.J. and Kirkham, D. (1962). Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity determinations. *Soil Sci. Am. Proc.*, 26: 421-426.
- Lagny, C. (1996). Comportement mécanique des sols fins sous fortes contraintes et fortes pressions négatives. PhD Thesis, Ecole Centrale Paris.
- Lambe, T.W. (1958). The structure of compacted clay. *Jnl. of the Soil Mech. and Foundn. Div ASCE*, 84 (SM2): 10-34.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1959). The role of the effective stress in the behaviour of expansive soils. *Quart. Of the Colo. Sch. Of Mines*, Vol. 54 (4): 33-66
- Lambe, T.W. (1960). A mechanistic picture of shear strength in clay. *Research Conf. On Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, Colorado: 555-580
- Lang, A.R.G. (1967). Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40 °C. *Australian J. Chem.*, 20: 2017-2023.
- Lawton, E.C., Fragaszy R.J. and Hardcastle, J.H. (1989). Collapse of compacted Clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No 9.

- Lawton, E.C., Fragaszy R.J. and Hardcastle, J.H. (1991). Stress ratio effects on collapse of compacted Clayey sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No 5.
- Lee, H.C. and Wray W.K. (1992). Evaluation of soil suction instruments. *Proc. 7th International Conference on Expansive Soils*, Dallas: 307-312.
- Lee, H.C. and Wray W.K. (1995). Techniques to evaluate soil suction – A vital unsaturated soil variable. In E.E. Alonso and P. Delage (eds.) *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 2: 615-622.
- Lide, D.R. and Frederikse, H.P.R. (1997). *CRC Handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data*. CRC Press, New York.
- Lo Presti, D.C.F., Pallara, O. and Puci, I. (1995). A modified commercial triaxial testing system for small strain measurements: preliminary results on Pisa clay. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 18 (1): 15-30.
- Lloret, A. y E.E. Alonso (1980). Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour”. *Géotechnique* 30, No 4: 449-447.
- Lloret, A. (1982). Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Lloret, A. y E.E. Alonso (1985). State surfaces for partially saturated soils. *Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng. San Francisco*, 2: 557-562.
- Lloret, A. (1993). Métodos de medida y aplicación de succión en laboratorio. *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE, Universidad Politécnica de Catalunya*, primera edición: 127-143.
- Lloret, A. (1996). *Mecánica de suelo no saturados*. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartografía. E.T.S.I. de Caminos. Universidad Politécnica de Catalunya UPC.
- Macari, E.J., Parker, J.K. and Costes, N.C. (1997). Measurement of volume change in triaxial test using digital imaging techniques. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 20 (1): 103-109.
- Maswoswe, J. (1985). Stress path for compacted soil during collapse due to wetting. Ph.D. Thesis, Imperial college, London.
- Mata, C., Romero, E., and Ledesma, A. (2002). Hidro-chemical effects on water retention in bentonite-sand mixtures. *International Conference on Unsaturated Soils*, Recife, Brazil, A.A. Balkema, Rotterdam Vol. 1: 283-288.
- Matyas, E.L. y Radhakrishna, H.S. (1968). Volume change characteristics of partially saturated soils. *Géotechnique*, 18, No 4: 432-448.
- Meyer, K., Lorenz, P., Böhl-Kuhn, B. and Klobes, P. (1994). Porous solids and their characterization. *Methods of investigation and application. Cryst. Res. Technol.*, 29 (7): 903-930.
- Miller, D.J. and Elrick, D.E. (1958). Dynamic determination of capillary conductivity extended for non-negligible membrane impedance. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 22: 483-486.
- M.I.T., (1963). *Eng. Behaviour of partially saturated soils*. Research Report, R.: 63-26.
- Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of soil behaviour*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2nd ed.
- Mongioli, L. & Tarantino, A. (1998). An apparatus to investigate on the two effective stresses in unsaturated soils. *Proc. 2nd Int. Conf. On Unsaturated Soils*, Beijing, International Academic Publishers, 1: 442-425.
- Moore, P.J. and Millar, D.V. (1971). The collapse of sands upon saturation. *Proc. Of the 1st Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics*, Melbourne 1: 54-60.
- Morel, G. (1980). General Report. *International Conference on Compaction*, Paris, Vol. 3: 57-76
- Obaidat, M.T. and Attom, M.F. (1998). Computer Vision-based technique to measure displacement in selected soil test. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 21, No. 1: 31-37.
- Ohmaki, S. (1982). Stress-strain behaviour of anisotropically, normally consolidated cohesive soil. *Proc. 1st Int. Symp. Num. Mod. Geomech.*, Zurich: 250-269.
- Olson, R.E. and Langfelder, L.J. (1965). Pore-water pressures in unsaturated soils. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 91(4): 127-160
- Poorooshasb, H.B. (1961). The properties of soils and other granular media in simple shear. Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- Prashanth, J.P., Sivapullaiah, P.V. and Sridharan, A. (1998). Compaction curves on volume basis. *Geotechnical Testing Journal* GTJODJ 21(1): 58-65.

- Proctor, R.R. (1933). Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News Record* 111: 245-248; 286-289; 348-351.
- Rampino, C., Mancuso, C. and Vinale, F. (1999). Laboratory testing on unsaturated soil: equipment, procedures and first experimental results. *Canadian Geotechnical Journal*, No. 36:1-12.
- Rampino, C., Mancuso, C. and Vinale, F. (2000). Experimental behaviour and modelling of an unsaturated. *Canadian Geotechnical Journal*, No. 37: 748-763.
- Rengmark, F. and Erikson, R. (1953). Apparatus for investigation of swelling, compression and elastic properties of soils. *Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1: 180-183.
- Reséndiz, D. (1977). Compacting conditions, state variables engineering properties of compacted clay. *International Conference on Compaction, Paris*, Vol. I: 195-202.
- Richards, B.G. (1974). Application of an experimentally based non-linear constitutive model of soils in laboratory test. *Aust. Geomech. Jnl.* G8: 20-30.
- Richards, B.G. (1984). Finite element analysis of volume change in expansive clays. *Proc. 5th I.C.E.S.* Adelaide, Vol. 2: 355-362.
- Richards, L.A. (1941). A pressure membrane extraction apparatus for soil suction. *Soil Sci.* 51: 377-386.
- Richards, L.A. and Ogata, G. (1958). A thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity. *Science*. No. 128: 1089-1090.
- Rico, A. y del Castillo, H. (1976). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*, No. 1, Limusa, México.
- Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1993). A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43 (2): 321-324.
- Ridley, A.M. & Burland, J.B. (1995). Measurement of suction in materials which swell. *Applied Mechanics Reviews*, 48(9).
- Romero, E., Facio, J.A. & Yang, D.Q. (1994). Boom clay: DIT-UPC Data File. Internal Report Universidad Politécnica de Cataluña.
- Romero, E., Facio, J.A., Lloret, A., Gens, A. & Alonso, E.E. (1997). A new suction and temperature controlled triaxial apparatus. In *Proc. 14th ICSMFE*, Hamburg. A.A. Balkema, Rotterdam. Vol.1: 185-188
- Romero, E. (1999). Thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Ph. D. Thesis, Technical University of Catalunya, Barcelona.
- Romero, E., Gens, A. and Lloret, A. (1999a). Water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, 54: 117:127.
- Romero, E., Gens, A. and Lloret, A. (2000). Temperature effects on water retention and water permeability of an unsaturated clay. H. Rahardjo, D.G. Toll and E.C. Leong (eds), *Proc. Of the Asian Conf. On Unsaturated Soils*, Singapore, Rotterdam, Balkema: 433-438.
- Romero, E. and Vaunat, J. (2000). Retention curves of deformable clays. *International Workshop On Unsaturated Soils: Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Trento, Italy. A.A. Balkema, Rotterdam: 91-106.
- Romero, E. (2001). Controlled suction techniques. *Proc. 4th Simposium Brasileiro de Solos Não Saturados*, Porto Alegre, Brasil.
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Wroth, C.P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique* 8: 22-52.
- Seed, H. B. and Chan A.M. (1959). Structure and strength characteristics of compacted clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E.*, Vol. 85, SM5: 87-128.
- Satija, B.S. (1978). Shear behaviour of partially saturated soils. Ph. D. Thesis, Indian Inst. of Tech., Delhi.
- Schofield, A.N. (1935). The pF of the water in soil. *Trans. 3rd Int. Cong. Soil Science*, Vol. 2: 37-48.
- Scholey, G.K., Frost, J.D., Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M. (1995). A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, 18 (2): 137-156.
- Shibuya, S., Park, C.S., Tatsuoka, F., Abe, F., Teachavorasinskun, S., Kohata, Y. and Sato, T. (1994). The significance of local lateral-strain measurement of soil specimens for a wide range of strain. *Soils and Foundations*, 34 (2): 95-105.

- Schreiner, H.D. (1988). Volume change of compacted highly plastic African clays. Ph.D. Thesis Imperial College, University of London.
- Shoji Kato and Katsuyuki Kawai, (2000). Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state. *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society. Vol. 40, No. 5: 75-90.
- Sivakumar, V. (1993). A critical state framework for unsaturated soil. Ph. D. Thesis, University of Sheffield, U.K.
- Skempton, A.W. (1961). Effective stress in soils, concrete and rocks. Conference on Pore Pressure and Suction in soils, Butterworths, London: 4-16.
- Skopek, P. And Cyre, G.P. (1995). A resistance wire transducer for circumferential strain measurement in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 18 (1): 106-111.
- Slatter, E.E., Jungnickel, C.A., Smith, D.W. and Allman, M.A. (2000). Investigation of suction generation in apparatus employing osmotic methods. In H. Rahardjo, D.G. Toll and E.C. Leong (eds). *Proc. Of the Asian Conf. on Unsaturated Soils*, Singapore, Rotterdam, Balkema: 297-302.
- Spanner, D.C. (1951). The peltier effect and its use in the measurement of suction pressure. *J. Exptl. Botany* No. 2: 145-168
- Stoicescu, J.T., Haug, M.D., and Fredlund, D.G. (1998). The soil-water characteristics of sand-bentonite mixtures used for liners and covers. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils*. Beijing, Vol. 1: 143-148.
- Symes, M. and Burland, J.B. (1984). Determination of local displacements on soil samples. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 7 (2): 49-50.
- Tang, G.X., Graham, J. and Wan, A.W.L. (1998). On yielding behaviour of an un saturated sand-bentonite mixture. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils*. Beijing, China, Vol. 1: 149-154.
- Tarantino, A. and Mongiovì, L. (2000). A study of the efficiency of semi-permeable membranes in controlling soil matrix suction using the osmotic technique. In H. Rahardjo, D.G. Toll & E.C. Leong, *Proc. Of the Asian Conf. on Unsaturated Soils*, Singapore, Rotterdam / Balkema: 303-308.
- Tarantino, A., L. Mongiovì and G. Bosco (2000). An experimental investigation on the independent isotropic stress variables for unsaturated soils. *Géotechnique*, 50(3): 275-282.
- Thomas, H.R. and He, Y. (1998). Modelling the behaviour of unsaturated soil using an elastoplastic constitutive model. *Géotechnique*, 48 (5): 589-603.
- Thomé, J.F.J. (1993). Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada. Tesis Doctoral; Universidad Politécnica de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. CEDEX, 1993.
- Toll, D.G. (1988). The behaviour of unsaturated compacted naturally occurring gravel. Ph.D. Thesis, University of London.
- Toll, D.G. (1990). A framework for unsaturated soil behaviour. *Géotechnique*, Vol. 40, No.1: 31-44.
- Toll, D.G. (1995). A conceptual model for the drying and wetting of soil. In E.E. Alonso and P. Delage. *Proc. 1st Conf. On Unsaturated Soils*, Paris, Rotterdam:Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 2: 805-810
- Truong, H.V.P. & Holden, J.C. (1995). Soil suction measurement whit transistor psychrometer. *Proc. 1st Int. Conf. On Unsaturated Soils*, Paris. E.E. Alonso and P. Delage (eds.), Balkema 7 Presses des Ponts et Chaussées, 2: 659-995.
- Van Genuchten, M. Th. (1978). Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new, closed – form analytical model. Research Report 78-WR-08. Water Resources Program, Dep. of Civil Engineering, Princeton University, Princeton.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soils Sci. Am. J.* 44: 892-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., and Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength whit respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 379-392.
- Vaughan, P.R. (1985). Mechanical and hydraulic properties of in-situ soils. General Report. Sess. 2 Proc. 1st Int. Conf. in Geomech. in Tropical Lateritic and saprolitic Soils, Brasilia.

- Vaunat, J., Romero, E. and Jommi, C. (2000). An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils. International Workshop On Unsaturated Soils: Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Trento, Italy. A.A. Balkema: 21-138.
- Vázquez-Suñé, E. (1998). Les Aigües subterrànies del Plà de Barcelona”. Tesis de Master de Hidrología Subterrànea. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Verbrugge, J.C. (1978). Emploi d’une methode psychrometrique dans des essais triaxiaux sur limon remaïné non saturé. Can. Geotech. Journal, 15: 501-509.
- Vicol, T. (1990). Comportement hydraulique et mécanique d’un solfin non saturé. Application à la modélisation, Tesis di Dottorato, Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, Paris.
- Vilar, O.M. (1995). Suction controlled oedometer tests on a compacted clay. Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris. E.E. Alonso and P. Delage, Balkema / Presses des Ponts et Chaussées, 1: 201-206.
- Wheeler, S.J., (1986). The stress-strain behaviour of soils containing gas bubbles. Ph.D. Thesis, University of Oxford.
- Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. (1993). Development and application of a critical state model for unsaturated soil. Predictive soil mechanics. Thomas Telford, London: 709-728.
- Wheeler, S.J. and Karube, D. (1995). State of the art report. Constitutive modelling. In Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris. Vol. 3: 1323-1356.
- Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. Géotechnique, 45 (1): 35-53.
- Wheeler, S.J. (1996). Inclusion of specific water volume within an elasto-plastic model for unsaturated soil. Canadian Geotechnical Journal. 33: 42-57.
- Wheeler, S.J. and Sivakumar, V. (2000). Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 2 : Shearing and constitutive modelling. Géotechnique 50 (4): 369-376.
- Willard, H.H., Merritt, L.L. and Dean, J.A. (1974). Instrumental methods for analysis. D. Van Nostrand Company, New York, 5th ed.
- Wood, D.M. (1990). Soil behaviour and critical state soil mechanic. Cambridge University Press, Cambridge.
- Woodburn J.A., Holden, J.C. and Peter P. (1993). The transistor psychrometer: a new instrument for measuring soil suction. Unsaturated Soils Geotechnical Special Publications No. 39, Dallas. S.L. Houston and W.K. Wray , ASCE: 91-102.
- Wroth, D.M. and Houlby, G.T. (1985). Soil Mechanics: Property characterization and analysis procedure. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 1: 1-55.
- Wu, S., Gray, D.M., Richard, F.E.Jr. (1984). Capillary effects on dynamic modulus at high strains. Proc. 11th I.C.S.M.F.E., San Francisco.
- Yong, R. N., Japp, R.D. and How, G. (1971). Shear strength of partially saturated clays. Proc. 4th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Fdn. Engng. Bangkok, 2, 12:183-187.
- Yoshimi, V. and Osterberg, J.O. (1963). Compression of partially saturated cohesive soils. J. of Soil Mech. And Found. Div. A.S.C.E., vol. 89, SM4: 1-24.
- Yudhbir (1982). Collapsing behaviour of residual soils. Proc. 7th Southeast Asian Geot. Conf., Hong-Kong, Vol.1: 915-930.
- Yuk Gehling, W.Y. (1994). Suelos expansivos: estudio experimental y aplicación de un modelo teórico. Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya.

ANEXO A

Procedimiento de ensayos edométricos con control de succión

A.1 Introducción

La nueva célula edométrica con control de succión se diseñó y construyó en los laboratorios de Geotecnia de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña). Las principales características de la nueva célula edométrica se describen en el subcapítulo 3.5 del Capítulo 3, en la Fig. 3.7 se presentan las partes principales que componen la célula edométrica y en la Fig. 3.10 el esquema general de la célula.

A.2 Equipo e instrumentación

Equipos complementarios

- Célula triaxial convencional para el proceso de fabricación de las muestras (Fig. A.2)
- Anillo cortador del diámetro de la probeta (Fig. A.3)
- Herramientas: espátula, cuchillo, llaves Allen y cortador de alambre
- Plataforma giratoria
- Agua destilada u otra de composición definida
- Cronómetro
- Balanza, de capacidad superior a 500 g de resolución ∂ 0.01 g
- Horno con capacidad a 110 $^{\circ}\text{C}$ y recipientes para secado en estufa

A.3 Metodología

A.3.1 Pasos previos

- ∄ Saturación del disco cerámico (AVEA) mediante la aplicación de una presión de agua u_w durante un periodo de 2 a 3 días (Bishop & Henkel, 1957)
- ∄ Determinación de la permeabilidad al agua del disco cerámico. Permeabilidad inicial de 6.7×10^{-11} m/s (Fig. 3.13, Capítulo 3)
- ∄ Desaerado del agua desmineralizada del sistema de presión de agua
- ∄ Llenado con agua desaerada del medidor de cambio de volumen de agua, y los interceptores de burbujas de aire (IBA) (Fig. 3.9).
- ∄ El disco cerámico es cubierto con una fina capa de agua destilada para evitar la desaturación del disco cerámico durante el proceso de fabricación de la muestra
- ∄ Circular agua desaera por la línea de drenaje del agua intersticial para el desalojo de aire

A.3.2 Preparación de la muestra

El procedimiento de compactación se realizó en una cámara triaxial convencional, compactando la muestra en condiciones isotropas (Fig. A.2); en el Capítulo 4 se explica con detalle el procedimiento de compactación (esfuerzo controlado).

- ∅ La probeta compactada se coloca sobre un dispositivo giratorio para su labrado
- ∅ Las probetas de suelo de 50 mm de diámetro y 20 mm de altura se extraen de la zona central de las probetas cilíndricas (70 mm de diámetro y 40 mm de altura), (Fig. A.1) compactadas en condiciones isótropas (Fig. A.2)
- ∅ La probeta compactada se coloca sobre el dispositivo giratorio para su tallado con un anillo cortador ($\lambda=50$ mm, $h=20$ mm) y con la ayuda de un cuchillo o cortador de alambre. Procurando no modificar sus condiciones iniciales de humedad y densidad. Al mismo tiempo del labrado, forzar ligeramente el anillo cortador para que penetre en la muestra (Fig. A.3)
- ∅ Cuando el suelo llena por completo el anillo cortador, se enrasan las caras de la probeta cortando el material sobrante con el alambre acerado
- ∅ Tomar material sobrante del tallado para determinar su contenido de humedad inicial, posteriormente se pesa la muestra y se miden sus dimensiones
- ∅ La probeta se extrae del anillo cortador y se introduce en el anillo del edómetro (No 4 de la Fig. 3.10) (Fig. A.3), para su posterior ensayo

A.3.3 Montaje

- ∅ Tan pronto como la probeta entra en contacto con el disco cerámico (AVEA) se abre el sistema de presión de agua a una presión atmosférica, para que la probeta absorba agua por capilaridad para recuperar el equilibrio de su succión inicial
- ∅ Los cuatro cuerpos del edómetro, se ajustan con 8 tornillos de denominación M10x30 (Fig. 3.7)
- ∅ Las conexiones de los sistemas para imponer la de presión de poros (u_a , u_w) y la presión vertical (ω_v) se conectan (Fig. A.4).
- ∅ El marco de acero inoxidable, unido a la base del edómetro donde está colocado el micrómetro mecánico (resolución de $2 \sigma m$) es centrado y se posiciona con un nivelador (Fig. A.4)

A.3.4 Desarrollo del ensayo

- ∅ Se impone una baja presión vertical sobre la muestra de 25 kPa, para el ajuste del mecanismo de transmisión de presiones
- ∅ La presión de aire (u_a) y la presión vertical (ω_v), se incrementan simultáneamente con una diferencia de 25 kPa hasta alcanzar la presión vertical neta inicial de ensayo ($\omega_v - u_a$)
- ∅ La succión matricial se aplica simultáneamente empleando la técnica de traslación de ejes, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$)
- ∅ Con las etapas anteriores se establece en la probeta la succión tras la compactación isótropa, bajo un esfuerzo vertical neto de 0.025 MPa
- ∅ Estas condiciones iniciales de esfuerzo y succión se mantienen como mínimo durante dos días, para garantizar las condiciones iniciales del ensayo. Registrando los sistemas de medida

- ∄ Cada etapa de carga se mantiene como mínimo dos días bajo succión constante. Para evitar cambios de succión (disminución) se realizaron incrementos pequeños de la carga vertical
- ∄ En trayectorias mojado–secado se varía la succión matricial en la muestra, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$), bajo una presión neta vertical constante ($\omega - u_a$). Se registran los cambios del volumen de agua y los cambios volumétricos del suelo
- ∄ El procedimiento de descarga, se realiza tomando las mismas consideraciones al procedimiento de carga, hasta llegar a una carga neta vertical ($\omega - u_a$) de acuerdo al programa de ensayo

A.3.5 Desmontaje

- ∄ Se reduce a cero la presión de agua ($u_w = 0.0$ MPa). Se cancela el sistema de presión del agua (u_w) para evitar su pérdida en la muestra durante el proceso de descarga
- ∄ Se reduce simultáneamente la presión de aire y la presión de cámara con una diferencia de presión vertical neta sobre la muestra de 20 kPa hasta obtener una presión nula sobre la probeta
- ∄ Desconectar los sistemas de presión de aire y agua, retirar el micrómetro mecánico para separar las piezas que componen la célula edométrica, posteriormente extraer la muestra
- ∄ Pesar el anillo mas muestra húmeda, medir con precisión el cambio de altura de la probeta para corroborar con las lecturas tomadas del micrómetro y anotar el valor en la hoja de registro
- ∄ Pasar la probeta del anillo a una cápsula numerada y tarada, procurando no perder material e introducirla en el horno a 110 °C durante 18 horas como mínimo para su secado

A.4 Observaciones

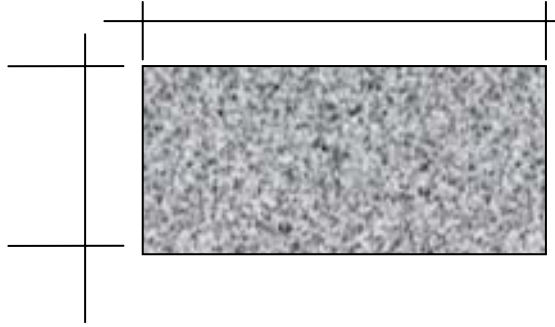
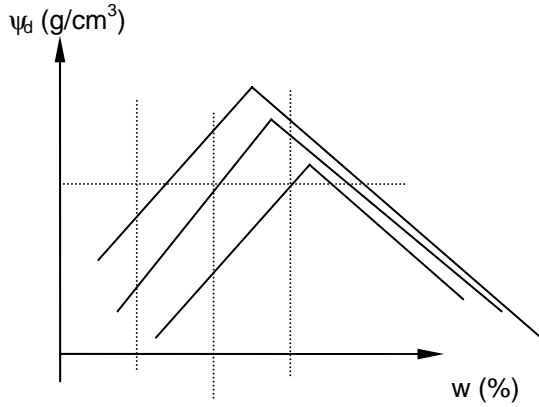
- ∄ Durante el ensayo es extremadamente importante controlar la temperatura del laboratorio, con una variación de ± 1 °C para obtener lecturas fiables en los cambios de volumen de agua
- ∄ Realizar constantemente un flujo a presión en el sistema de presión de agua (u_a) para eliminar el aire disuelto a través del disco cerámico
- ∄ Se registran suficientes lecturas de tiempo–deformación y tiempo–cambio de agua
- ∄ Limpiar el equipo y dejar el disco cerámico saturando para posteriores ensayos

A.5 Formato y hoja de registro

**NUEVA CÉLULA EDOMÉTRICA
con control de la succión**

Fecha: _____

No. de ensayo: _____



e_o = _____

Sr (%) = _____

Succión inicial (MPa) = _

$(\omega_m - u_a)_o$ (MPa): _____

ψ_{d0} (g/cm³) = _____

w_o (%) = _____

W_{anillo} (g) = _____

$W_{(\text{anillo} + \text{probeta})_o}$ (g) = _____

$W_{p.\text{inicial}}$ (g): _____

$W_{(\text{anillo} + \text{probeta})f}$ (g) = _____

$W_{p.\text{final}}$ (g) = _____

χ_i (mm): _____

h_i (mm): _____

A (mm²) _____

V (mm³): _____

Testigos de humedad inicial

No. de tara	W_t (g)	$W_{\text{sh}+t}$ (g)	$W_{\text{ss}+t}$ (g)	W_w (g)	W_s (g)	w (%)

Testigos de humedad final de la probeta

No. de tara	W_t (g)	$W_{\text{sh}+t}$ (g)	$W_{\text{ss}+t}$ (g)	W_w (g)	W_s (g)	w (%)

Observaciones: _____

**NUEVA CÉLULA EDMÉTRICA
con control de la succión**

Hoja de registro

Ensayo No: _____ ($\omega_m - u_a$)₀ (MPa): _____ ψ_{60} (g/cm³): _____

W₀(%): _____ e₀= _____ No. hoja: _____

Célula No. _____ Material: _____ Lectura Inicial (micrómetro): _____

$\omega_v - u_a$ MPa	ω_v MPa	u_a MPa	u_w MPa	s MPa	No. de días	t	Lectura microm.	L(w). cm ³	Fecha	hora
						0				
						10"				
						15"				
						30"				
						1'				
						2'				
						5'				
						10'				
						20'				
						30'				
						1 h				
						2 h				
						3 h				
						4 h				
						8 h				

u_a = presión de aire; u_w = presión de agua; $s = (u_a - u_w)$ = succión matricial; ω_v = presión de cámara; $\omega_v - u_a$ = esfuerzo medio neto vertical; $L(w)$ = lecturas del medidor de cambio de agua.

Observaciones: _____



Figura A.1 Probeta ($\lambda\#$ 70 mm, h = 40 mm), antes de la compactación isotrópica.



Figura A.2 Compactación estática, bajo condiciones isotrópica de una probeta ($\lambda\#$ 70 mm, h= 40 mm), para obtener por medio de labrado una probeta ($\lambda\#$ 50 mm, h = 20 mm) para un ensayo edométrico.



Figura A.3 Anillos de acero inoxidable para labrar probetas en los ensayos edométricos, obtenidas de una probeta compactada en condiciones isótropas.

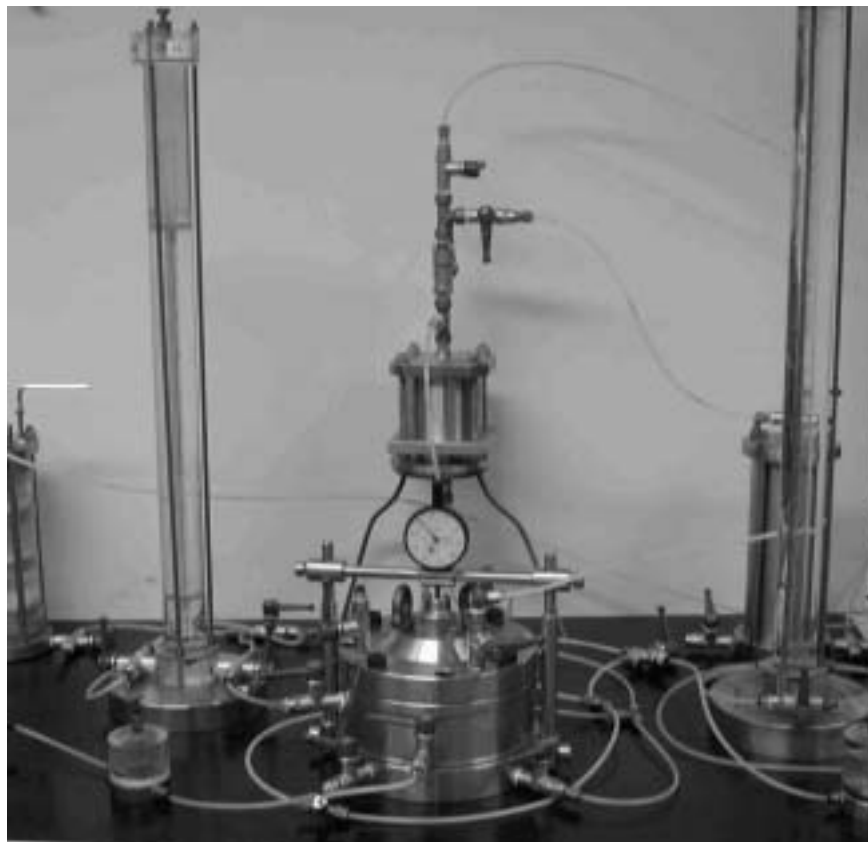


Figura A.4 Edómetro con succión controlada.

ANEXO B

Procedimiento de ensayos isotrópos con control de succión Mini – célula isotrópica rígida

B.1 Introducción

La mini-célula isotrópica rígida con control de succión se diseñó y construyó en los laboratorios de Geotecnia de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña), en la Fig. 3.18 del Capítulo 3 se presenta el esquema general del equipo. El diseño de la mini-célula tiene dos principales características:

- ∄ Con la dimensión de la probeta: diámetro de 20 mm y una altura de 20 mm, se disminuye el tiempo de equilibrado de las presiones de aire (u_a) y agua (u_w) de poros
- ∄ La muestra es sometida a un estado tensional isotrópico en una cámara rígida, cuyas paredes presentan un grosor de 29 mm en acero inoxidable minimizando posibles deformaciones del equipo (Fig. 3.18 y 3.21 del Capítulo 3)

B.2 Descripción de la mini - célula isotrópica rígida

En la Fig. 3.19 del Capítulo 3, se presenta la mini-célula rígida isotrópica. El equipo consta de dos cuerpos principales: cuerpo superior e inferior (base). Los dos cuerpos están unidos dejando una cavidad interna de 54.5 cm³. El cuerpo inferior de la célula de acero inoxidable contiene una serie de conductos que permiten dar la presión de confinamiento, así como la presión de aire (u_a) y de agua (u_w) a la muestra.

La muestra descansa sobre un pedestal cilíndrico que a la vez contiene un disco cerámico de alto valor de entrada de aire (1.5 MPa) y una segunda piedra porosa anular concéntrica con el disco (Fig. B.1). La piedra porosa anular de 20 mm de diámetro exterior y 15 mm de diámetro interior; ésta es, caso contrario al disco cerámico, de una elevada permeabilidad y está comunicada con los conductos con los cuales se impone la presión de aire (u_a) de poros.

Cuando están unidos los dos cuerpos (inferior y superior) la cavidad interna se comunica con dos conductos del cuerpo inferior donde se podrá controlar la presión de confinamiento, el cuerpo superior tiene una entrada externa, sobre el eje vertical de la célula, que comunica con la cámara de confinamiento, y que permite verificar el llenado de la cámara con el líquido de confinamiento y expulsar el aire (Fig. B.4). Es importante remarcar que la estanqueidad del conjunto es imprescindible, por lo cual, el cuerpo inferior tiene incorporado en su parte superior una junta tórica 39x2 (39 mm de diámetro interior x 2 mm de grueso) que asegura un acoplamiento hermético de los dos cuerpos (Fig. B.1, B.2).

B.2.1 Equipos complementarios

B.2.1.1 Equipos de medida. Medidores de volumen

El medidor de volumen determina el volumen de líquido que circula a través de sus dos entradas. Consiste de una bureta de vidrio de 7 mm de diámetro y 675 mm de longitud, ubicado en el interior de un cilindro de metacrilato de 30 mm de diámetro interior y 680 mm de longitud. La parte inferior de ambos cilindros concéntricos están llenos de agua, mientras la parte superior de un gasoil, con un color claramente diferenciado y una densidad más baja que el agua, asegurándose de la no-homogeneidad (Fig. 3.9 y 3.20, Capítulo 3). Aunque la resolución del sistema de lecturas sea de 0.02 cm^3 , pueden estimarse variaciones de 0.01 cm^3 sin dificultad. En el ensayo se utilizan dos medidores de volumen: a) uno destinado a medir el flujo que entra o sale de la cámara de confinamiento de la célula, que indica la deformación volumétrica de la muestra (Fig. 3.20); b) el segundo mide la cantidad de agua intersticial que entra o sale de la muestra, por tanto, permite determinar los cambios de humedad (Fig. 3.20).

B.2.1.2 Presión de aire e interfaces

El laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería de Terreno dispone de dos líneas de aire a presión: una de 8 – 10 bar y la segunda de 30 – 40 bar; la presión de aire las suministran dos compresores que trabajan independientemente. Se de reguladores, Bellofram tipo 70 para proveer una presión de 1.8 MPa (rango de trabajo: 10 kPa hasta 0.9 MPa), y Fairchild modelo 10 para proveer una presión de 3.5 MPa (rango de trabajo: 25 kPa hasta 2.5 MPa). Este sistema permite mantener una presión constante en la muestra durante el ensayo. La combinación de los reguladores con transductores de presión permite el control de presión con una resolución de 1 kPa.

Cuando se desea controlar la presión de un fluido se utiliza un elemento interface, que recibe por una de las entradas una presión de aire determinada convirtiendo como salida la misma presión de un fluido. Estas interfaces consisten de una cámara cilíndrica de 200 mm de longitud de acero inoxidable. Una membrana de látex ajustada a la cara superior divide la cámara en dos dominios aire y agua (Fig. 3.9 y 3.20, Capítulo 3). De esta manera, la salida inferior del elemento interface comunica una presión de líquido igual a la presión de aire, que es transmitida por la membrana en el interior de la cámara.

B.2.1.3 Eliminación del aire en las líneas de agua a presión

Es importante que el agua de la cámara de confinamiento, de los medidores de volumen y de todos los conductos de agua a presión no contenga aire ya sea en fase gaseosa o disuelto en el agua. Los siguientes elementos intentan cumplir con este propósito:

Interceptores de burbujas de aire (IBA): Los interceptores de burbujas de aire, consisten de una pequeña cámara de metacrilato de 5 cm de diámetro y 5.1 cm de altura, en su base dispone de dos entradas por las que pasa un flujo de agua a presión (Fig. 3.9 y 3.20). Si el flujo de agua contiene una burbuja de aire, al llegar al IBA tiende a quedarse en la parte superior de la cámara. En la configuración global de la mini-célula isótropa y de los elementos auxiliares (equipos de medida) se incluyen 2 elementos IBA para la línea de presión de agua (u_w) y 2 para la línea de presión de confinamiento (Fig. 3.20).

Cámara de agua desaerada (CAD): Los IBA evitan que entren burbujas de aire en el sistema durante el desarrollo del ensayo, pero existen aspectos en los cuales resulta ineficaz.

El agua de la que se dispone a priori en los ensayos, no está totalmente desaerada, si no que contiene aire disuelto afectando: las líneas y medidores de volumen, y el líquido de confinamiento.

En ambos casos las lecturas de los medidores de volumen se ven afectadas, donde este aire disuelto experimenta importantes cambios de volumen frente a variaciones de presión impuestas. Para evitar estos dos efectos se ha optado para comunicar el agua a presión con una cámara de agua desaerada (CAD), de manera que el aire del sistema migre por difusión a esta segunda cámara. Esta cámara (CAD) tiene una entrada superior por donde se comunica una presión negativa de aire, por medio de una bomba de succión. Para mantener la eliminación de aire por difusión durante todo el ensayo es preciso que el agua de la cámara CAD se desaere con cierta regularidad sin que resulte afectada la línea de presión de confinamiento, con este propósito se realizó una conexión en *by pass* entre las dos entradas de la cámara que permiten mantener la presión de confinamiento mientras se extrae aire de la cámara CAD (Fig. 3.20).

B.2.1.4 Variación de los esfuerzos y control de las trayectorias de esfuerzos

Las tres presiones generadas que afectan al estado tensional de la muestra son: presión de confinamiento (ω_β), presión de aire (u_a) y presión de agua (u_w). En los ensayos, la presión de aire (u_a) se mantiene constante. El esfuerzo (presión) de confinamiento (ω_β) y la presión de agua (u_w) se impusieron a una velocidad de variación constante. Se utilizó un motor reductor de corriente continua, el cual es ensamblado a dos reductores conectados en serie acoplado a un regulador Fairchild modelo 10, (conectado a un sistema interfase) permitiendo los cambios de presión de confinamiento o los cambios de succión. Las características del motor reductor y de los reductores son las siguientes:

Motor reductor de corriente continua

- Marca HELY
- Tipo MR 52-45-H
- Potencia útil en el eje 75 W
- Reducción a la salida 1/571
- Par máximo a la salida 35 mN

1er Reductor Acoplado en serie

- Marca Mecánica Moderna
- Tipo EP84-102
- Reducción a la salida 1/230

2do reductor acoplado en serie al primer reductor

- Reductor por engranajes con tres salidas

B.3 Metodología de los ensayos

B.3.1 Pasos previos

- ∉ Saturación del disco cerámico (AVEA) con agua destilada y desaerada, durante un periodo de tiempo, como mínimo 2 días (Bishop & Henkel, 1957).

- ∄ Se determina la permeabilidad al agua del disco cerámico. $k_{d0} = 1.1 \times 10^{-10}$ m/s (Fig. 3.15)
- ∄ Se desmonta el cuerpo superior, dejando una cubierta de agua destilada sobre la superficie del disco cerámico para evitar su desaturación durante los pasos siguientes
- ∄ El agua de la cámara CAD se desairea con una bomba de succión en intervalos de 15 min
- ∄ Las líneas de los medidores de volumen, así como los medidores de volumen y los interceptores de burbujas de aire (IBA) se llenan con agua desairada proveniente de la cámara CAD
- ∄ Se circula agua proveniente de la cámara CAD a través del sistema de presión de agua (u_w) y de los conductos de la presión de confinamiento
- ∄ Al finalizar los pasos anteriores, la cantidad de agua desairada de la cámara CAD ha disminuido, por lo que se requiere nuevamente su llenado y desairar

B.3.2 Preparación de la muestra

El procedimiento de compactación se realiza en una cámara triaxial convencional, compactando la muestra en condiciones isotropas (Fig. C.1), en el Capítulo 4 se explica con detalle el procedimiento de compactación.

- ∄ La probeta compactada se coloca sobre el dispositivo giratorio para su labrado
- ∄ La probeta compactada (Fig. C.1) se coloca sobre el dispositivo giratorio, se labra con el anillo cortador ($\lambda=20$ mm, $h=20$ mm) forzando ligeramente el anillo para que penetre en la muestra con ayuda de un cuchillo o cortador de alambre, girando al mismo tiempo la base, procurando no modificar sus condiciones iniciales de humedad y densidad. Al llenar por completo el anillo cortador, enrasar las caras de la probeta cortando el material sobrante con el alambre acerado montado en un arco. Posteriormente, la probeta se extrae del anillo cortador
- ∄ Se determina su contenido de humedad inicial con el material sobrante del labrado. La probeta a ensayar, se pesa y se verifican sus dimensiones, anotando los datos en la hoja de registro

B.3.3 Montaje

- ∄ Un recubrimiento delgado de grasa de silicona se coloca alrededor del pedestal y cabezal, para garantizar la adherencia de la membrana
- ∄ Tan pronto como la probeta entra en contacto con el disco cerámico (AVEA) se abre el sistema de presión de agua a presión atmosférica, para que el suelo absorba agua por capilaridad y recuperar el equilibrio de su succión inicial
- ∄ Colocación de la membrana:
 - Se ha optado por una membrana de látex de 0.3 mm de grueso (Fig. B.2). El ajuste de la membrana se consigue empleando juntas tóricas en la parte inferior y superior (Fig. B.3)
 - El acoplador de membranas (Fig. B.3) es un pequeño complemento destinado a tal efecto: consiste en una pequeña pieza exteriormente cilíndrica e interiormente resulta el molde del conjunto cabezal–muestra–pedestal. El procedimiento para colocar la membrana con este instrumento es el siguiente:
 - § Se recorta un dedo del guante quirúrgico y se introduce en el acoplador
 - § Se succiona el acoplador por el orificio de su parte superior. En este momento la membrana queda adherida al contorno interior del acoplador

- § Manteniendo la succión se ajusta el acoplador al conjunto cabezal–muestra–pedestal y después se libera la succión mantenida hasta el momento. En este instante la membrana se adherirá elásticamente al conjunto cabezal–muestra–pedestal
- § Seguidamente se recorta la parte terminal de la membrana que sobra por la parte superior del cabezal que contienen un volumen de aire no deseado
- § Finalmente se utiliza el mismo acoplador para estirar la tórica de ajuste de la membrana con el pedestal y cabezal
- § Es importante remarcar que el colocado de la membrana se ha de efectuar con el conducto de aire abierto a presión atmosférica, para que no quede aire entre la membrana y la muestra (Fig. B.2)
- ∄ Se ensamblan los dos cuerpos del equipo con 8 tornillos M10x30
- ∄ Llenado de la cámara con agua destilada proveniente de la cámara CAD por gravedad, para evitar burbujas de aire manteniendo abierto el conducto que nos permite verificar el llenado de la cámara (Fig. B.4)
- ∄ Una vez realizado el llenado de la cámara isotropa, llenar nuevamente la cámara CAD y conectar la bomba de vacío, y desaerar el agua en intervalos de 15 minutos

B.3.4 Desarrollo del ensayo

- ∄ Se impone una pequeña presión de confinamiento de 25 kPa, para reducir errores debido a movimientos de acoplamiento, así como verificar posibles fugas de agua del sistema
- ∄ La presión de aire y de confinamiento, se incrementan simultáneamente manteniendo una diferencia de 25 kPa hasta alcanzar el esfuerzo medio neto inicial del ensayo ($\sigma_m - u_a$)
- ∄ La succión matricial se aplica simultáneamente, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$)
- ∄ Con las etapas anteriores se establece la condición inicial en esfuerzo y succión, tras la compactación isotropa en la muestra. Estas condiciones se mantienen como mínimo durante dos días, para garantizar las condiciones iniciales del ensayo
- ∄ En trayectorias de carga–descarga, la presión de cámara se impone por medio del motor reductor una velocidad de variación constante de 0.04 MPa/día hasta llegar al esfuerzo medio neto ($\sigma_m - u_a$) deseada bajo succión constante. Se registran lecturas de los cambios de volumen de agua de la cámara para definir la curva tiempo–deformación
- ∄ En las trayectorias de mojado–secado se varía la presión de agua con el motor reductor a una velocidad de variación constante de 0.02 MPa/día, hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$), bajo un esfuerzo medio neto constante ($\sigma_m - u_a$). Se registran las lecturas del cambio de agua para determinar la humedad y tiempo de equilibrio

B.3.5 Desmontaje

- ∄ Manualmente se reduce a cero la presión de agua (u_w). Se cancela el sistema de presión del agua (u_w) para evitar su pérdida en la muestra durante el proceso de descarga
- ∄ Manualmente se reduce simultáneamente la presión de aire (u_a) y de confinamiento (σ_b) con una diferencia en el esfuerzo medio neto sobre la muestra de 20 kPa hasta tener una presión nula
- ∄ La muestra se remueve del pedestal y se extrae cuidadosamente de la membrana

- ∄ Medir las dimensiones de la probeta para corroborar con las lecturas tomadas del medidor de volumen durante el ensayo y anotar el valor en la hoja de registro
- ∄ La muestra se corta en 4 partes aproximadamente iguales para determinar su contenido de agua. Cada parte de la muestra se pasa a una cápsula numerada y tarada y es introducida en un horno a 110 °C durante 24 horas como mínimo. Anotar los valores en la hoja de registro

B.4 Observaciones finales

- ∄ Durante el ensayo es extremadamente importante el control de la temperatura del laboratorio, con una variación de $\pm 1 \text{ °C}$ para obtener lecturas fiables en los medidores de volumen de agua
- ∄ Realizar constantemente un flujo a presión en el sistema de presión de agua (u_a) para eliminar el aire disuelto a través del disco cerámico
- ∄ Registrar suficientes lecturas de tiempo-cambio de volumen, para definir completamente el comportamiento hidráulico-deformacional

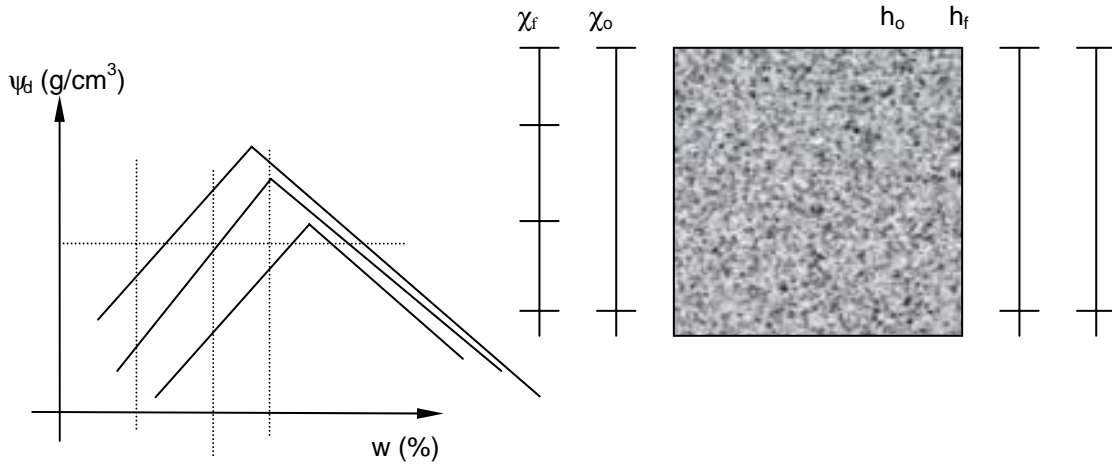
B.5 Formato y hoja de registro

**Ensayos isotropos con control de succión
Mini-célula isotropa rígida**

Hoja de registro

Fecha: _____

No. de ensayo: _____



$e_0 =$ _____ Sr_0 (%) = _____ s_0 (MPa) = _____ $e_f =$ _____
 $(\omega_m - u_a)_0$ (MPa) = _____ ψ_{d0} (g/cm³) = _____ w_0 (%) = _____
 $W_{(peso\ probeta\ inicial)}$ (g) = _____ $W_{(peso\ probeta\ final)}$ (g) = _____
 $A_0 = \phi D^2 / 4$ (mm²) = _____ $V_0 = Ah$ (mm³) = _____
 $A_f = \phi D^2 / 4$ (mm²) = _____ $V_f = Ah$ (mm³) = _____

Testigos de humedad inicial

No. de tara	Wt (g)	Wsh+t (g)	Wss+t (g)	Ww (g)	Ws (g)	W (%)

Testigos de humedad final de la probeta

No. de tara	Wt (g)	Wsh+t (g)	Wss+t (g)	Ww (g)	Ws (g)	W (%)

Observaciones: _____

Ensayos isotropos con control de succión Mini-célula isotropa rígida

Hoja de registro

Ensayo No: _____ Q (MPa): _____ ψ_{60} (g/cm³): _____ w_0 (%): _____

material: _____ No. de hoja: _____ Vel. del motor reductor: _____

u _a MPa	u _w MPa	s MPa	L(w) cm ³	ω_3 MPa	$\omega_m - u_a$ MPa	No. de día	t	L(c) cm ³	Fecha

u_a = Presión de aire; u_w = Presión de agua; $s = (u_a - u_w)$ = Succión matricial; ω_3 = Presión de cámara; $\omega_m - u_a$ = esfuerzo media neta; $L(w)$ = medidor de cambio de humedad; $L(c)$ = medidor de cambio de deformación.

Observaciones: _____



Figura B.1 Cuerpo inferior de la mini-célula isótropa rígida.

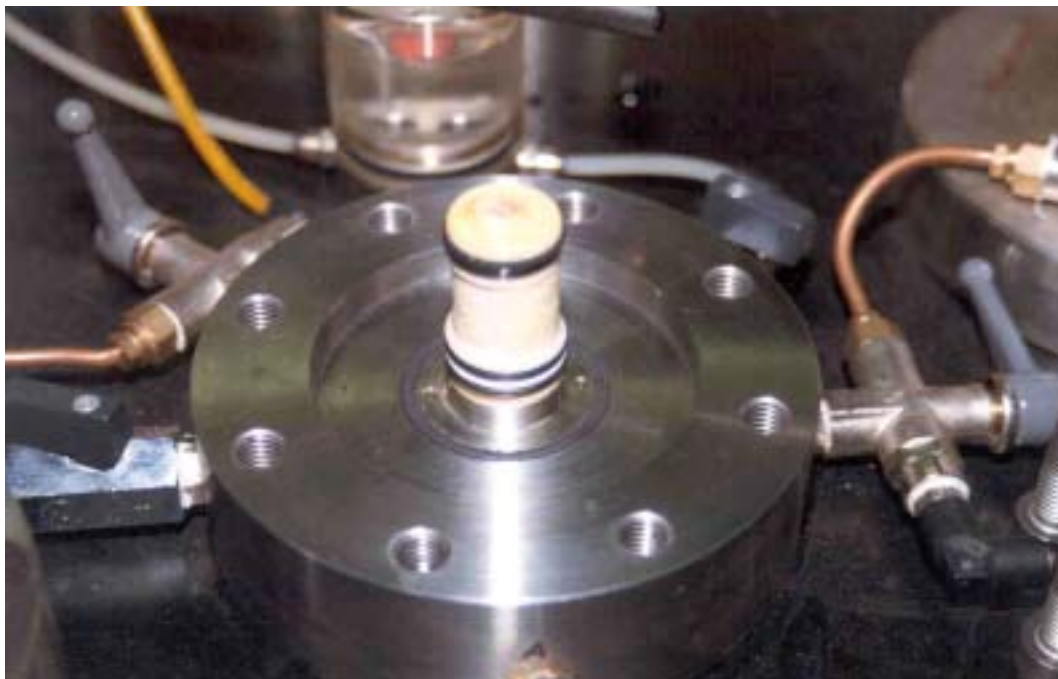


Figura B.2 Cuerpo inferior, mini-célula isótropa rígida con la muestra montada ($\lambda= 20$ y $h= 20$ mm).

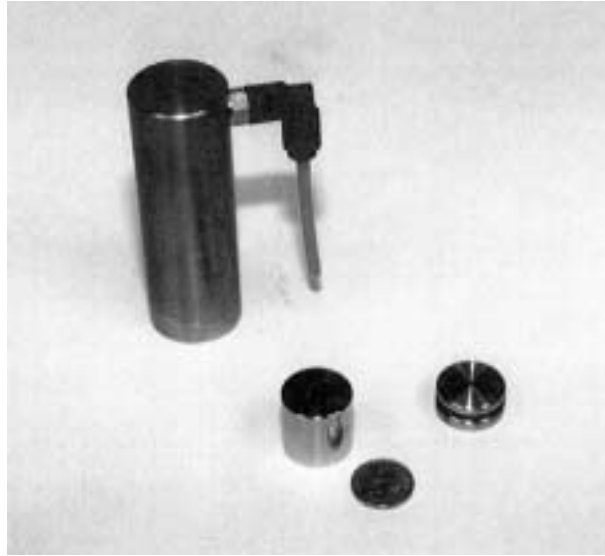


Figura B.3 Accesorios complementarios, de izquierda a derecha: acoplador de membranas; cilindro de acero inoxidable para calibraciones (dimensiones de la probeta), y cabezal.



Figura B.4 Mini-célula isotrópica rígida con los medidores de volumen.

ANEXO C

Procedimiento de ensayos isotrópicos y triaxiales en muestras no saturadas. Célula triaxial con control de succión

C.1 Objetivo

Presentar los pasos previos al ensayo, procedimientos de montaje de las muestras, y la metodología general llevada a cabo en los ensayos isotrópicos y de compresión triaxial.

C.2 Equipo e instrumentación

La célula triaxial con control de succión se diseñó y construyó en los laboratorios de Geotecnia de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña). Las principales características están en la sección 3.7 del Capítulo 3 y en la Fig. 3.21a se presenta el esquema general de la célula triaxial.

Un procedimiento sistemático y ordenado se llevó a cabo para la preparación y montaje de las muestras, así como el ensamble de los diferentes elementos mecánicos que conforman la célula triaxial. Las principales etapas seguidas durante esta operación son descritas en los párrafos siguientes. La duración que se invierte en el montaje de la muestra y ensamble de las piezas mecánicas es aproximadamente de 80 minutos de manera organizada.

Equipos complementarios

- Célula triaxial convencional para la fabricación de probetas a ensayar (Fig. C.1)
- Torno de fabricación de probetas (Fig. C.2)
- Agua destilada y desaerada
- Balanza de capacidad superior a 500 g de resolución ∂ 0.01 g
- Estufa de capacidad 110 VC y recipientes para secado en estufa
- Herramientas: espátula, cuchillo, cortador de alambre, llaves Allen y métrica
- Bomba de succión
- Pegamento instantáneo tipo cianocrilato
- Pintura acrílica blanca
- Base de acero plana, para la colocación de membranas y LDVTs
- Micrómetro con una resolución de 0.01 mm
- Acoplador de membranas
- Aparato Guía de los LVDTs internos

C.3 Metodología

C.3.1 Pasos previos

- ≠ Saturación de los discos cerámicos mediante la aplicación de agua a presión, se guía para ello el procedimiento propuesto por Bishop y Henkel (1957). En la Fig. 3.14 se muestran las piezas mecánicas para conseguir la saturación de los discos cerámicos AVEA.

- ∄ Determinación de la permeabilidad al agua de los discos cerámicos. Permeabilidad inicial del cabezal (1.2×10^{-10} m/s) y del pedestal (8.5×10^{-11} m/s) (Fig. 3.16)
- ∄ Los discos cerámicos, se cubren con una fina capa de agua destilada para evitar su desaturación durante los pasos siguientes
- ∄ Desaerado del agua destilada de una cámara CAD que alimenta el sistema de imposición del esfuerzo desviador mediante una bomba de succión en intervalos de 15 min
- ∄ Desaerado del agua que alimenta los sistemas de medidas de los cambios de volumen de agua
- ∄ Los medidores de volumen de cambio de agua y los IBA se llenan con agua desaerada, el aire atrapado es expulsado por el respiradero localizados en la parte superior (Fig. 3.9, Capítulo 3)
- ∄ Se produce un flujo de agua desaerada por bombeo manual, con objeto de llenar las líneas de drenaje de los pistones que se comunican con los discos cerámicos (AVEA)
- ∄ En ensayos triaxiales, la cámara inferior de presión (ω_p), se llena con agua desaerada desplazando el pistón de carga a una altura de 45 mm de la base (posición inicial de ensayo), por medio del motor reductor
- ∄ Accionar el sistema de adquisición de datos para lograr un equilibrio interno térmico y así minimizar los efectos de offsets

C.3.2 Preparación de la muestra

Una célula triaxial convencional, se utiliza para compactar las muestras, bajo condiciones isotropas (esfuerzo controlado) (Fig. C.1), en el Capítulo 4 se explica con detalle el procedimiento de compactación. La preparación de las muestras tanto para los ensayos isotropos como para los ensayos triaxiales se aplicó con mismo criterio.

- ∄ Probetas de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura son obtenidas mediante tallado de la zona central de una probeta compactada en condiciones isotropas, cuyas dimensiones iniciales son de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura (Fig. C.2). Durante el tallado de la probeta, se obtienen testigos de material para determinar su contenido de agua
- ∄ Al finalizar el tallado, se toma una serie de medidas de su diámetro (superior, centro, inferior), así como de su altura, las dimensiones son medidas con un micrómetro de resolución de 0.01 mm. La probeta a ensayar, se pesada y los datos son anotados en la hoja de registro (Fig. C.3)

C.3.3 Montaje

- ∄ Las primeras etapas del montaje de la muestra se realizan por separado, donde el pedestal, con sus conductos de agua previamente llenados, se coloca sobre una base plana de acero con una funda de plástico, cubierta por una capa de agua destilada con objeto de prevenir la posibilidad del secado del disco cerámico durante las primeras etapas de montaje (Fig. C.4).
- ∄ La célula de carga (ensayos triaxiales) es roscada entre el cabezal y el pistón superior. La pieza de alineación no-contacto (ensayos isotropos) es roscada en el pistón superior (Fig. 3.22). Las conexiones del sistema de presión de aire (u_a) y de agua (u_w) entre el pistón superior y el cabezal se conectan. Estos pasos se realizan antes de colocar el cabezal sobre la muestra para evitar momentos de torsión y alterar las condiciones de la muestra.
- ∄ La muestra se coloca entre el cabezal y el pedestal, lo cual debe ser adecuadamente orientada con objeto de no interferir las líneas de drenaje (aire y agua) del cabezal con las conexiones eléctricas y los LVDT (Fig. C.5).

- ∓ El cabezal con el pistón superior se mantiene fijo en posición vertical con un aparato auxiliar, ejerciendo un esfuerzo axial sobre el espécimen aproximadamente de 5 kPa, suficiente para mantener contacto entre el cabezal y la muestra (Fig. C.4). Tan pronto como la probeta entra en contacto con los discos cerámicos conectados a un sistema abierto de presión de agua, la probeta comienza absorber agua por capilaridad. Esto es importante para minimizar disturbios sobre las condiciones iniciales de la muestra
- ∓ Una delgada capa de grasa de silicona se coloca alrededor del pedestal y cabezal, con la finalidad de que la membrana tenga mayor adherencia. La membrana de látex se coloca en la muestra fijándola en el cabezal y pedestal por dos tóricas de 2.6x28 mm, asegurando el sello en los extremos. Esta membrana tiene un espesor que no excede al 1% del diámetro del espécimen y un diámetro interno del 90 % de la muestra, de acuerdo a las normas ASTM-D2850
- ∓ La membrana de látex se cubre con grasa silicona, con el propósito de evitar deslizamientos entre las membranas y proteger a la muestra de la migración de aire del fluido de confinamiento
- ∓ Una segunda membrana de silicona se coloca en la muestra. La membrana de 36.5 mm de diámetro interior y 0.75 de espesor es necesaria para fijar los elementos de plástico que soportan los transductores de desplazamiento axial. Posteriormente, una capa de pintura acrílica blanca se aplica en las zonas de medida por los sensores láser, con objeto de tener una buena señal, esta cubierta tiene un color blanco permanente durante el ensayo
- ∓ Los soportes y las bases de los LVDTs internos son posicionados con un aparato alineador para garantizar la posición del cero eléctrico, estos son adheridos a la membrana, colocados en la parte central de la probeta en dos posiciones diametralmente opuestas (Fig. C.4)
- ∓ La muestra (cabezal, pedestal y pistón superior) se traslada a la célula triaxial para finalizar el montaje (Fig. C.5). El cabezal y pistón superior ejercen una presión sobre la muestra de 15 kPa
- ∓ El pedestal se fija al pistón inferior de carga, teniendo cuidado de la posición del ensamble. Se conectan los conductos de agua y aire de poros y las líneas del drenaje exterior
- ∓ Se realiza un flujo de agua desaerada por bombeo manual, con objeto de llenar las líneas de drenaje de los pistones que se comunican con los discos cerámicos (AVEA) y expulsar el aire atrapado. En un sistema abierto se impone una presión de agua de 15 kPa
- ∓ Se conectan al sistema de adquisición de datos los LVDTs y célula de carga (Fig. C.5). La cámara es cuidadosamente ensamblada (sin tener contacto con el espécimen) en la base con 8 tornillos de denominación M10x30, posteriormente la tapa superior es ensamblada con la cámara con 8 tornillos de la misma denominación (Fig. 3.21b y 3.24)
- ∓ Sobre el pistón superior se conectan las líneas de drenaje de la presión de aire y de agua, comunicados hasta el cabezal por medio de los conductos del pistón superior. De igual manera que en el pedestal, se realiza un flujo de agua desaerada por bombeo manual, para expulsar el aire existente. Se mantiene un sistema abierto con una presión de agua de 15 kPa
- ∓ En ensayos isotropos, el pistón superior y aparato de alineación no-contacto, son mantenidos 5 mm por encima del cabezal por medio de un tornillo bloqueador externo, después de verificar la verticalidad del conjunto
- ∓ Los sensores láser se posicionan cercano al cero eléctrico de calibración, en su desplazamiento horizontal. En su posición vertical dependerá del tipo de ensayo. En ensayos isotropos, el láser se coloca de tal manera que registre la evolución del centro de la probeta, tomando como referencia el pedestal. En los ensayos de compresión triaxial, se tomará como referencia la parte superior de la probeta (cabezal) para el registro de la deformación radial local. *Es importante minimizar el tiempo de montaje, con la idea de evitar disturbios en las condiciones iniciales de la probeta*

C.3.4 Desarrollo del ensayo

- ∄ Una presión de cámara de 25 kPa es impuesta con la finalidad de reducir errores debido a movimientos de acoplamiento de los soportes de los LDVTs y de verificar posibles fugas en el sistema
- ∄ Los sensores láser se posicionan iluminando la parte inferior del pedestal (ensayos isótropos) o la parte inferior del cabezal (ensayos triaxiales), donde los datos se registran por el programa de adquisición de datos. Estos elementos (cabezal o pedestal) son tomados como referencia a través de todo el ensayo, posteriormente los sensores láser se colocan en el centro de la probeta
- ∄ En toda la altura de la muestra desde el punto de referencia del pedestal hasta el cabezal (ensayos isótropos) o del punto de referencia del cabezal hasta el pedestal (ensayos triaxiales), los sensores láser son recorridos, registrando el perfil de la muestra con objeto de detectar inclinaciones y establecer la configuración inicial de referencia
- ∄ La etapa inicial es similar a los ensayos isótropos con la mini-célula isótropa rígida y célula edométrica, donde la presión de aire y de cámara son incrementados simultáneamente por etapas con una diferencia de 25 kPa hasta alcanzar el esfuerzo medio neto inicial de ensayo ($\sigma_m - u_a$)
- ∄ La succión matricial se aplica simultáneamente empleando la técnica de traslación de ejes, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$)
- ∄ Con las etapas anteriores se establece en la probeta, la condición inicial en esfuerzo y succión, tras la compactación isótropa, manteniéndose como mínimo 48 horas, para garantizar las condiciones iniciales
- ∄ Los sensores láser son nuevamente recorridos, para registrar el perfil de la muestra tras imponer las condiciones iniciales de ensayo en la muestra
- ∄ En trayectorias de carga–descarga, llevada a cabo por etapas, se mantendrá cada etapa como mínimo 48 horas ($\sigma_m - u_a$), bajo succión constante, una vez llegado al equilibrio deformación
- ∄ En trayectorias de humedecimiento–secado, por etapas, se varía la succión matricial en la muestra, manteniendo la presión de aire constante y controlando la presión de agua hasta alcanzar una diferencia igual a la succión deseada ($u_a - u_w$), bajo un esfuerzo medio neto constante ($\sigma_m - u_a$). Registrando los cambios de volumen de agua de la muestra para determinar su humedad y el tiempo de equilibrado en cada etapa
- ∄ La trayectoria de descarga, se realiza tomando las mismas consideraciones al procedimiento de carga, hasta llegar al esfuerzo medio neto ($\sigma_m - u_a$) deseado
- ∄ En la trayectoria de rotura, la presión de cámara inferior, se impone por medio de un motor reductor, con un tiempo de falla alrededor de 12 días, logrando una deformación axial (κ_j) entre 18 y 25 % a una velocidad de variación constante de desplazamiento de 1.0 σ m/min, bajo una succión constante, registrando los cambios de agua de la muestra para determinar su contenido de humedad. En la sección 3.7.2.3 se explica con mas detalle la imposición del esfuerzo axial

C.3.5 Desmontaje

- ∄ Al finalizar el ensayo, la presión de agua se reduce a cero ($u_w = 0$). Se cancela la válvula que conecta el sistema de presión de agua con la muestra para evitar su pérdida en el proceso de descarga de la presión de confinamiento y de aire.

- ∄ Se disminuye simultáneamente la presión de aire y la presión de cámara con una diferencia del esfuerzo medio neto de $\omega_m - u_a = 20$ kPa hasta una presión nula en la probeta
- ∄ Los sistemas de presión (u_b , u_a y u_w) se desconectan y los sensores láser se desplazan hacia el exterior, para evitar contacto con la cámara al ser retirada.
- ∄ La muestra es removida del pedestal y cuidadosamente extraída de las membranas, teniendo cuidado de no perder material
- ∄ Medir con precisión, las dimensiones de la probeta para corroborar con las lecturas registradas durante el ensayo y anotar el valor en la hoja de registro
- ∄ La confirmación de la homogeneidad en contenido de agua de la muestra después de realizar trayectorias de humedecimiento y secado, se verifica midiendo contenidos de agua locales dividiendo la muestra en tres partes (Fig. C.6). Cada parte de la muestra se pasa a una cápsula numerada y tarada, se introduce en un horno a 110 °C durante 24 horas como mínimo para su secado, anotando los valores en la hoja de registro. En la sección 6.3.5, se presentan los contenidos de humedad

C.4 Observaciones finales

- ∄ Durante el ensayo es extremadamente importante el control de temperatura del laboratorio, con una variación de ± 1 °C, para obtener lecturas fiables en los cambios de volumen de agua
- ∄ Realizar constantemente el desaerado por medio de un flujo a presión en el sistema de presión de agua (u_a) para eliminar el aire difuso a través del disco cerámico
- ∄ Registrar suficientes lecturas de tiempo-cambio de volumen de agua para definir la etapa de equilibrio y los contenidos de humedad

C.5 Cálculos generales

1. En la hoja de registro de datos generales de ensayo se anota la humedad w , la relación de vacíos e , y el grado de saturación S_r , inicial y final
2. Deformación axial (ϵ_1); deformación radial (ϵ_2); deformación volumétrica (ϵ_v), y deformación de corte (ϵ_s)

$$\epsilon_2 = \frac{L_1 - L_2}{L_0} ; \epsilon_{h_{1,2}} = \frac{h_{1,2} - h_0}{h_0} \quad \alpha \quad \epsilon_1 = \frac{h_1 - h_2}{2}$$

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_2 \quad \text{y} \quad \epsilon_s = \frac{2}{3} \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}$$

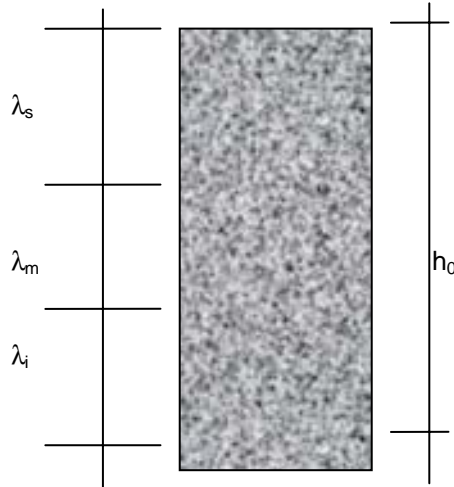
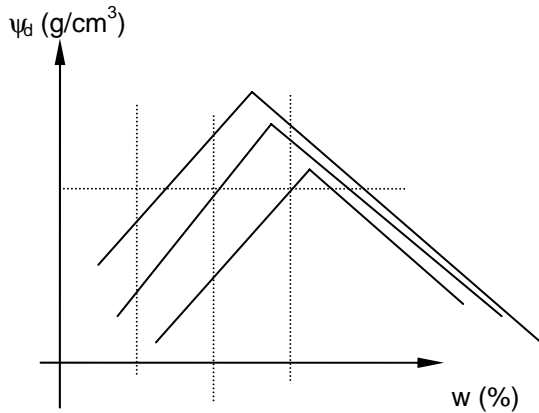
Donde, L_1 , desplazamiento radial (láser 1); L_2 , desplazamiento radial (láser 2); $h_{1,2}$, incremento axial (LVDTs 1 y 2); h_0 , altura inicial; L_0 , diámetro inicial de la muestra.

C.6 Formato y hoja de registro

CÉLULA TRIAXIAL CON CONTROL DE SUCCIÓN
Triaxiales e isótopos en suelos no saturados

Fecha: _____

No. de ensayo: _____



e_0 = _____ Sr_0 (%)= _____ Succión inicial (MPa)= _____

$(\alpha_m - u_a)_0$ (MPa): _____ ψ_{d0} (g/cm³) = _____ W_0 (%)= _____

$W_{(peso\ probeta)}$ inicial:= _____ $W_{(peso\ probeta)}$ final:= _____

λ (promedio) (mm): _____ h (promedio) (mm): _____

A (mm²)= _____ V (mm³): _____

Testigos de humedad inicial

No. de tara	W_t (g)	W_{sh+t} (g)	W_{ss+t} (g)	W_w (g)	W_s (g)	w (%)

Testigos de humedad final de la probeta

No. de tara	W_t (g)	W_{sh+t} (g)	W_{ss+t} (g)	W_w (g)	W_s (g)	w (%)
Superior						
Medio						
Inferior						

Observaciones: _____

CÉLULA TRIAXIAL CON CONTROL DE SUCCIÓN
Triaxiales e isotropos en suelos no saturados

Ensayo No. _____ No. de hoja: _____ $(\omega_m - u_a)_0$ (MPa): _____

ψ_{60} (g/cm³): _____ s_7 (MPa): _____ $W\%$: _____

LVDT-1, Externo (mm): _____ Vel. del pistón de carga (σ m/min): _____

LVDT-2, Externo(mm): _____

(LVDTs Internos)

u_a	u_w	s	ω_3	$\omega_4 u_a$	F	ω_p	Lvdt-p	L-1	L-2	Lvdt1	Lvdt2	Fecha y Hora	t
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	kN	MPa	mm	mm	mm	mm	mm		

$(\omega_m - u_a)_0$: presión isotropa de compactación; ω_3 : presión de confinamiento; ω_p : presión de cámara inferior; Lvdt-p: desplazamiento pistón de carga; L-1: sensor láser 1; L-2: sensor láser 2; F: célula de carga; s_0 : succión inicial.

Observaciones: _____



Figura C.1 Compactación estática en condiciones isotrópica (tensión controlada), cámara triaxial convencional ($\lambda_0=50$ mm, $h_0=100$ mm).

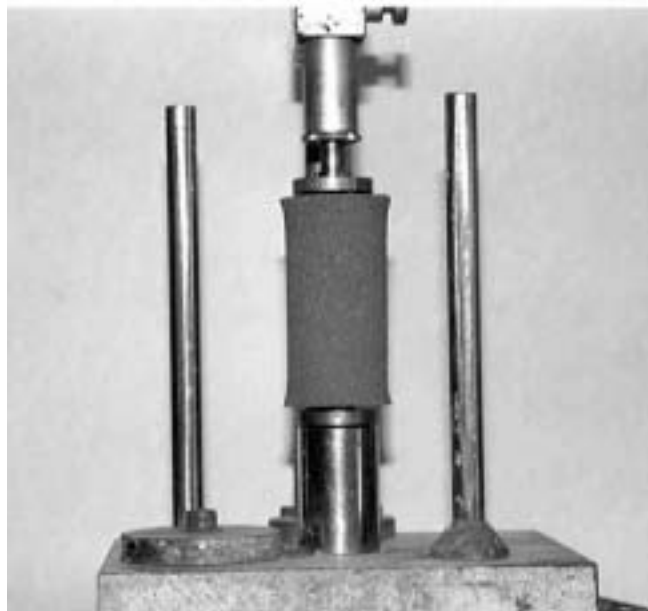


Figura C.2 Probeta tras la compactación isotrópica, antes del tallado para obtener una probeta de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura.



Figura C.3 Probeta de $\lambda_0 = 38$ mm y $h_0 = 76$ mm, en ensayos isótopos y triaxiales (célula triaxial con control de succión).



Figura C.4 Conexiones de los sistemas de presión (u_a , u_w), montaje de los LVDTs y colocación de las membranas sobre la muestra.



Figura C.5 Célula triaxial parcialmente ensamblada, mostrando la instrumentación interna.



Figura C.6 Obtención local del contenido de agua de la muestra al final del ensayo.

ANEXO D

Resultados experimentales

D.1 Ensayos triaxiales en muestras saturadas

Se presentarán las figuras de los ensayos triaxiales en muestras saturadas; los ensayos fueron programados para seguir trayectorias de esfuerzos para el análisis del comportamiento de rotura en muestras saturadas, enfocados en corroborar la forma *simétrica/elíptica* de la superficie de fluencia, así como a determinar los parámetros elásticos del suelo. En la sección 4.5.1 se muestran las trayectorias de esfuerzos realizadas, así como el programa de ensayos realizados. En la sección 4.5.2 se presenta el análisis de los resultados. En este anexo se presentaran las figuras de los resultados, y una descripción general para los grupos de ensayos CD-200, CD-300, CD-400, y el complemento de los resultados del grupo CD-100.

Se clasificaron tres grupos para presentar los gráficos mediante una descripción general de los ensayos triaxiales en muestras saturadas, resumiéndose en la Tabla 1.

- ∉ **Grupo 1:** corresponde a los resultados de la trayectoria 1. Los gráficos se presentan en términos del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), y los incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_l). Se observa que la presión de poros se controla durante todo el ensayo
- ∉ **Grupo 2:** se presentan los resultados en el plano $p' : \kappa_s$, obteniendo el esfuerzo de preconsolidación. En el plano $p' : q$, se obtiene el esfuerzo desviador correspondiente a la esfuerzo de preconsolidación, resultado un punto de la superficie de fluencia (p_0^*, q)
- ∉ **Grupo 3:** son los resultados de la trayectoria 2, donde los gráficos se presentan en términos del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), y los incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_l).

Del Plano $q : \kappa_l$ se obtuvieron el módulo de Young (E). Por otro lado, se obtiene la ordenada de un punto de la superficie de fluencia correspondiente al esfuerzo de preconsolidación p_0^* . En el plano $q : \kappa_s$, se obtiene el módulo de corte (G).

D.2 Ensayos triaxiales en muestras no saturadas

Se presentan el complemento de las figuras de los resultados experimentales del comportamiento hidromecánico de una arcilla de baja plasticidad, durante la aplicación de un desviador (Capítulo 6). En la sección 5.4 se incluyen el programa de ensayos y las trayectorias de esfuerzos realizadas, y en la sección 6.3 el análisis de los resultados obtenidos.

Tabla 1 Relación de las figuras – resultados de los ensayos triaxiales en muestras saturadas.

Número de figura	Ensayo	Grupo
F.1	CD-103	1
F.2	CD-104	3
F.3	CD-201	1
F.4	CD-201	2
F.5	CD-202	3
F.6	CD-202	2
F.7	CD-301	1
F.8	CD-301	2
F.9	CD-302	3
F.10	CD-302	2
F.11	CD-401	1
F.12	CD-401	2
F.13	CD-402	3
F.14	CD-402	2

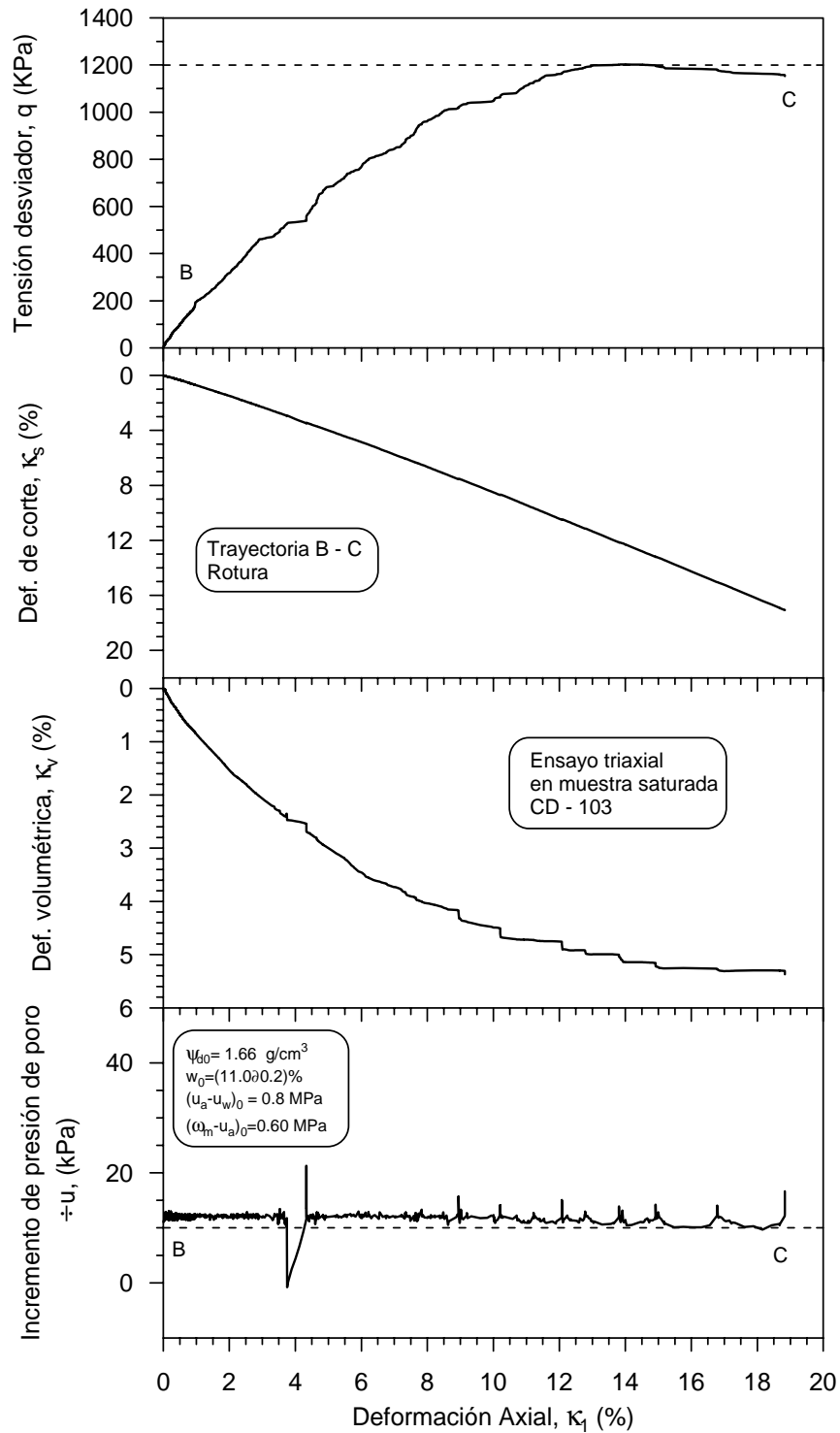


Figura D.1 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\pm u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-103).

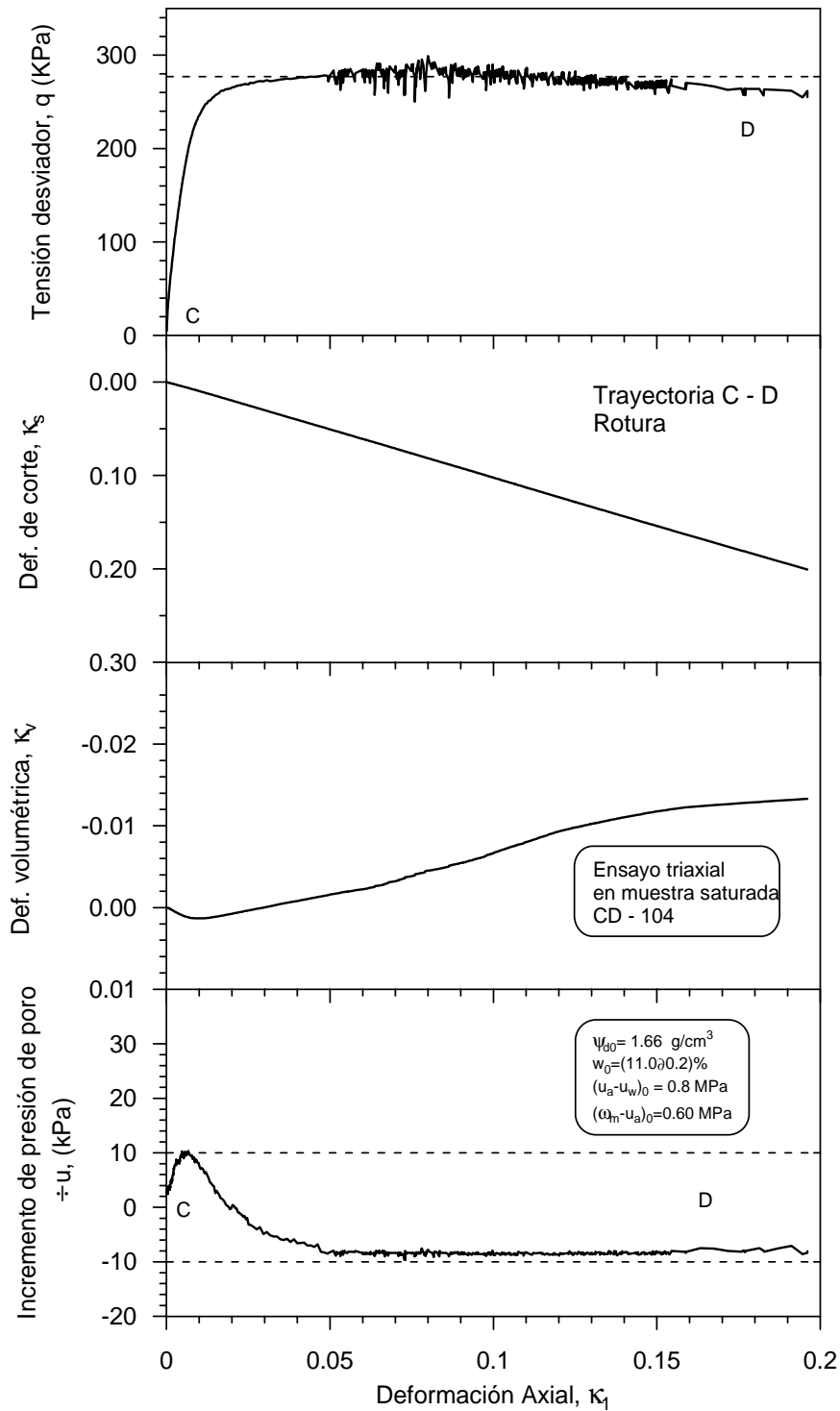


Figura D.2 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\pm u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Del plano $q : \kappa_1$ se obtiene el módulo tangente (E). Ensayo CD-104.

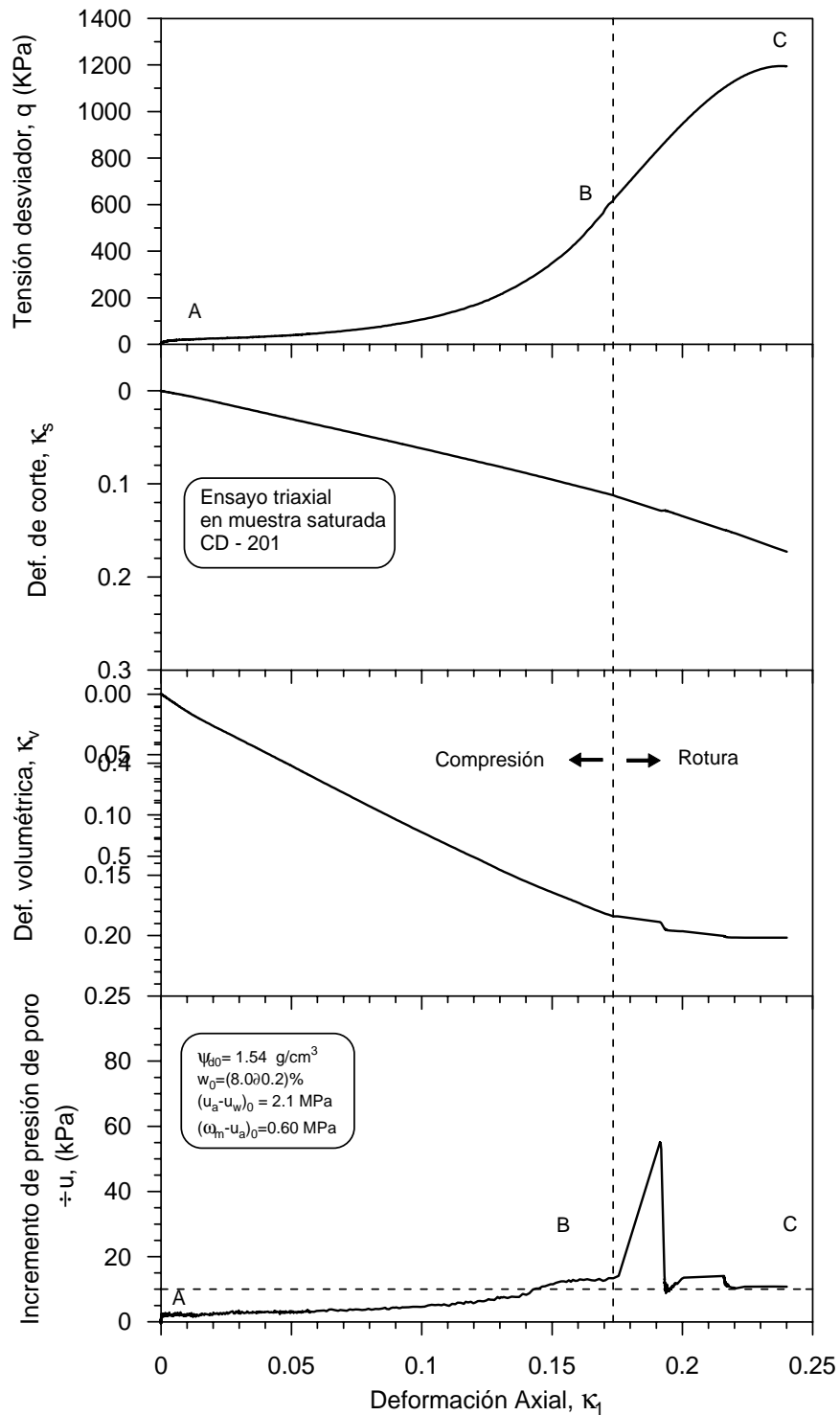


Figura D.3 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-201).

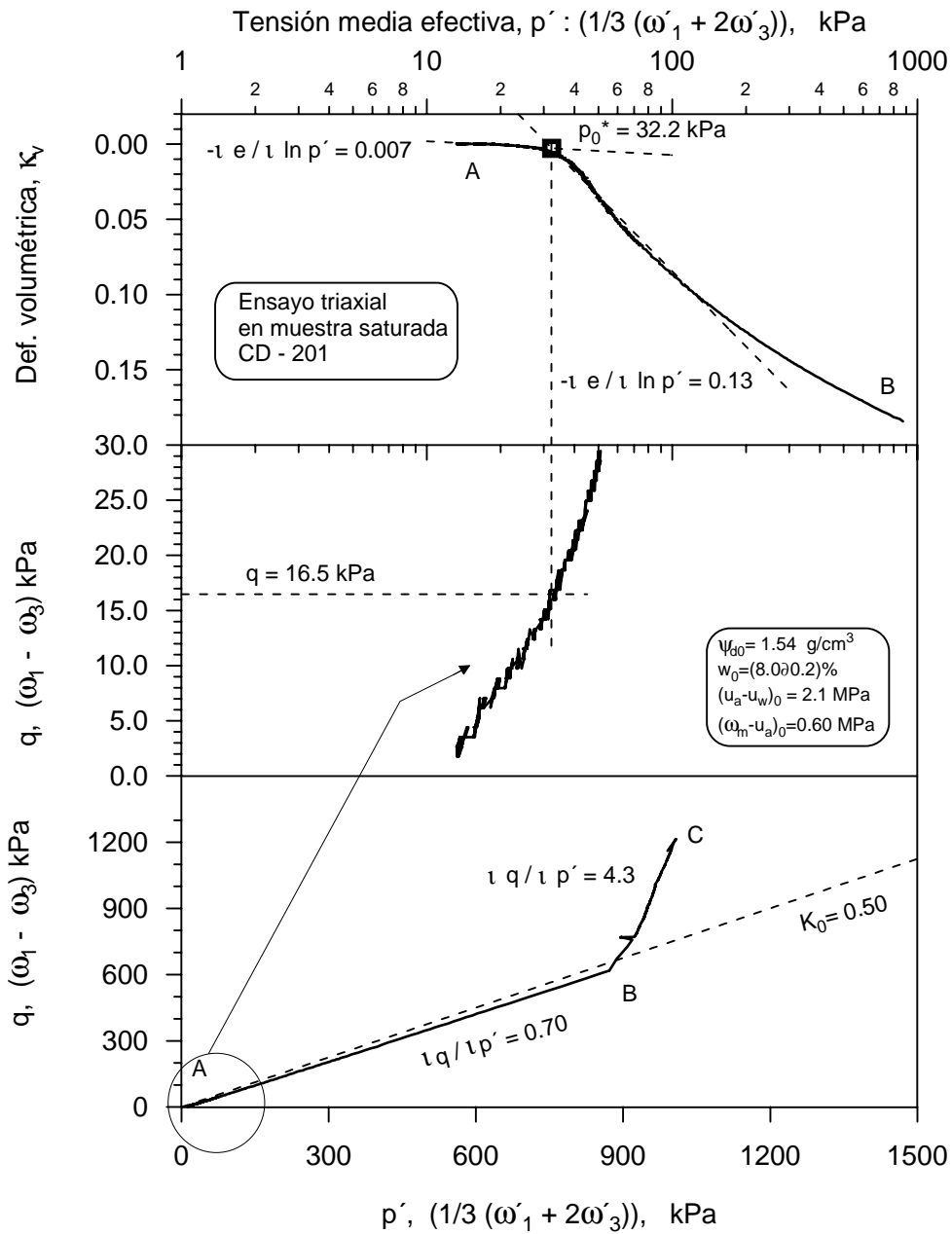


Figura D.4 Esfuerzo medio efectivo & deformación, y esfuerzo desviador (CD-201). Obtención de las coordenadas del punto en la superficie de fluencia (p_0^*, q).

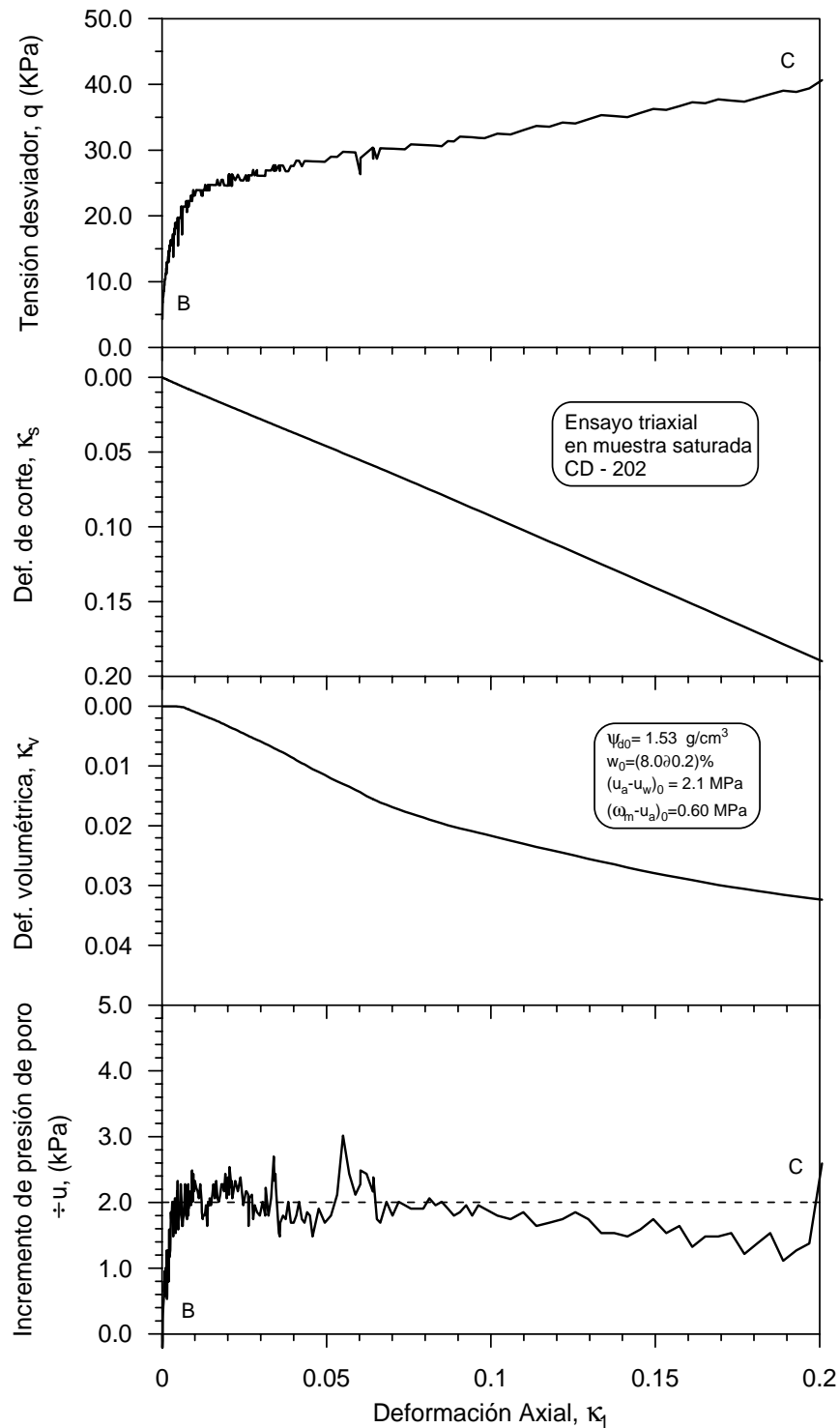


Figura D.5 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\div u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Del plano $q : \kappa_1$ se obtiene el módulo tangente (E). Ensayo CD-202.

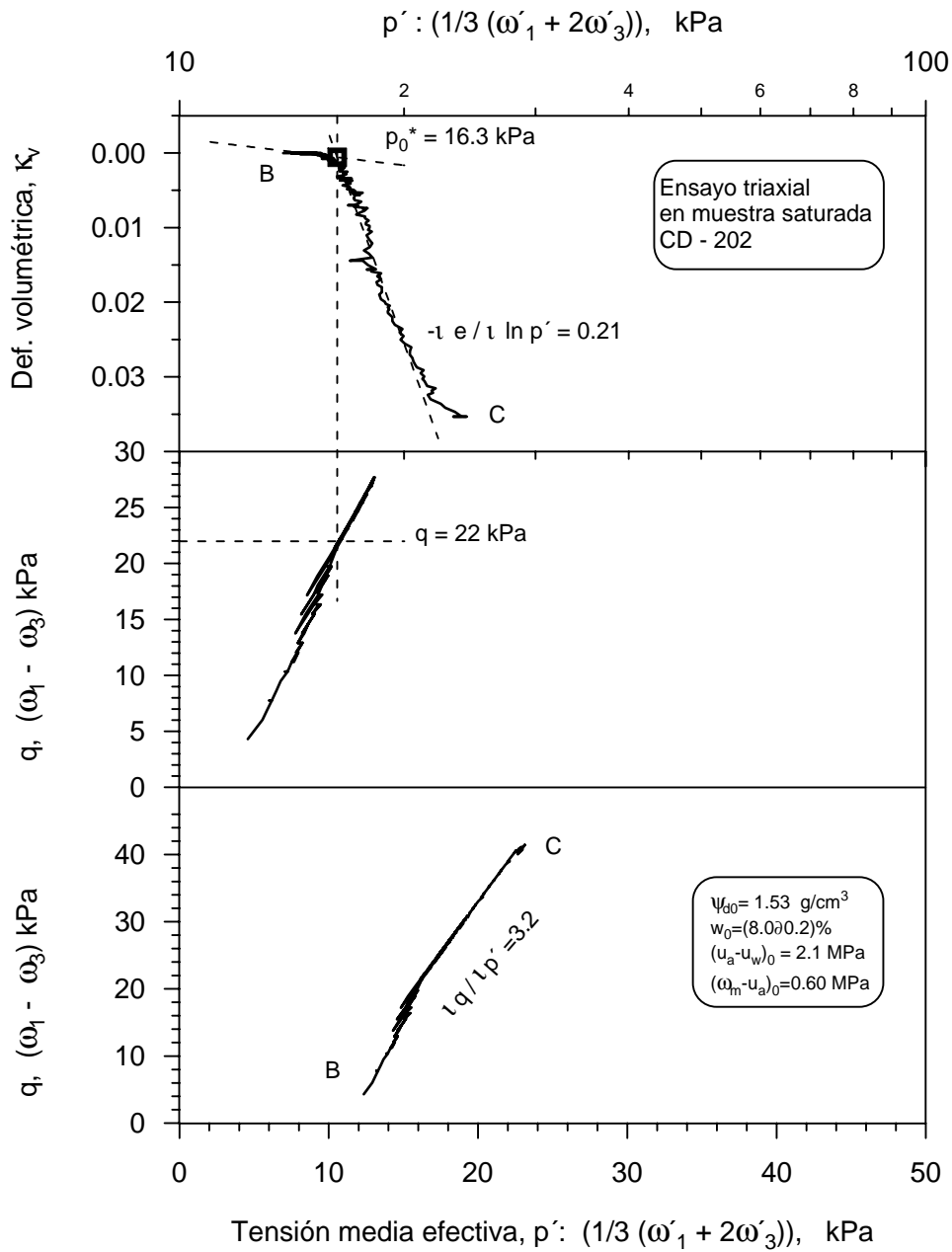


Figura D.6 Esfuerzo medio efectivo & deformación y esfuerzo desviado (CD-202). Obtención de las coordenadas del punto en la superficie de fluencia (p_0^*, q).

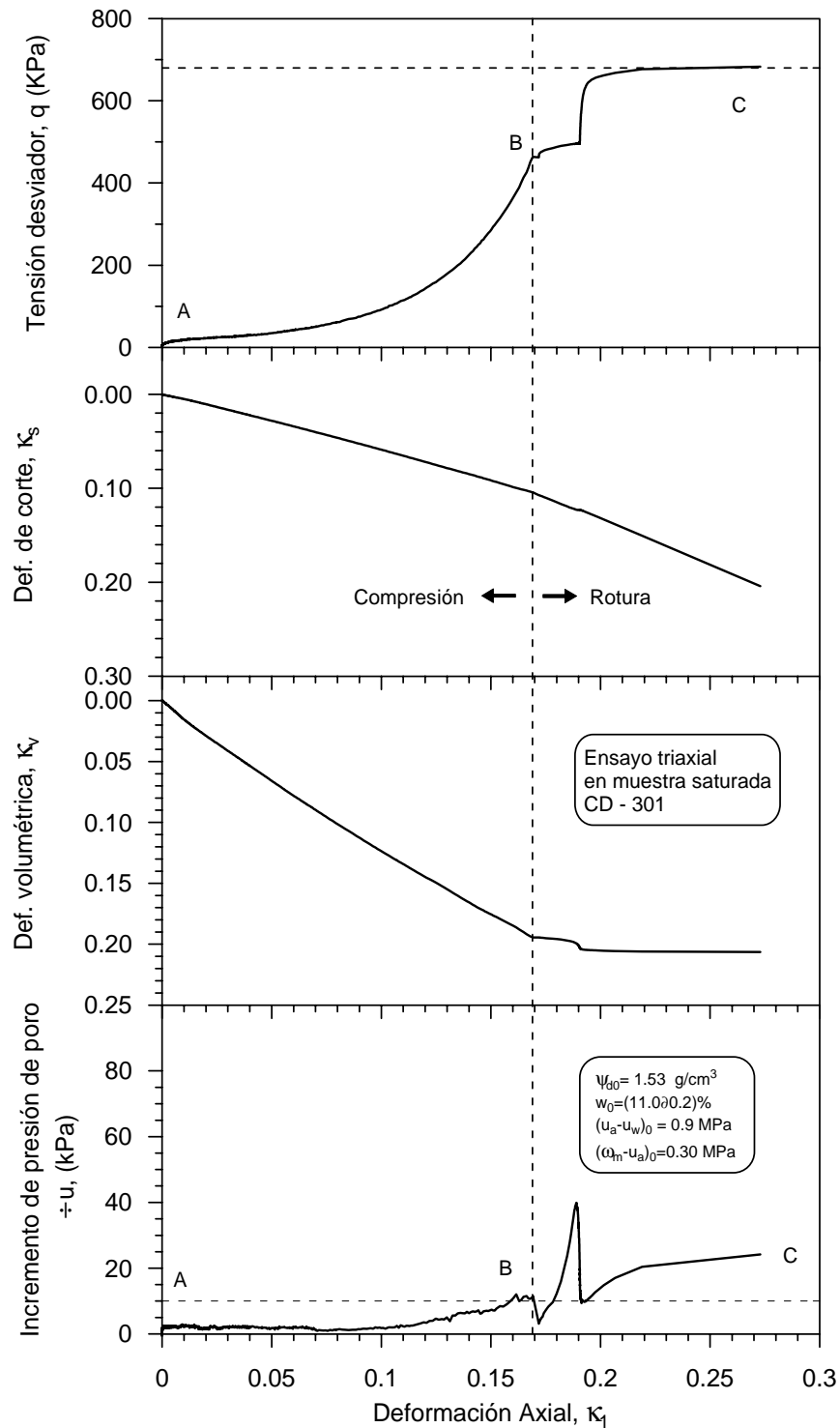


Figura D.7 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\pm u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-301).

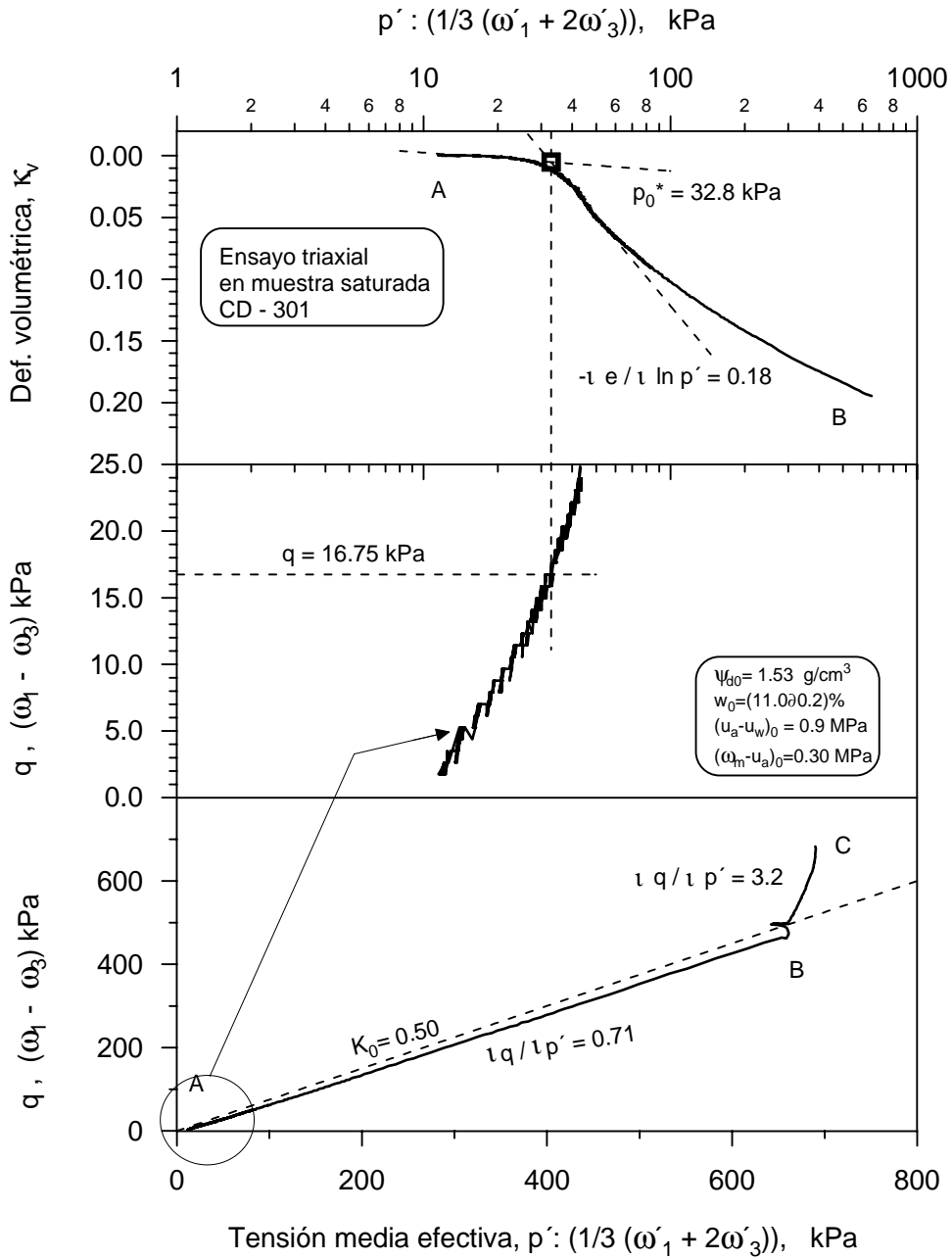


Figura D.8 Esfuerzo medio efectivo & deformación y esfuerzo desviador (CD-301). Obtención de las coordenadas del punto en la superficie de fluencia (p_0^*, q).

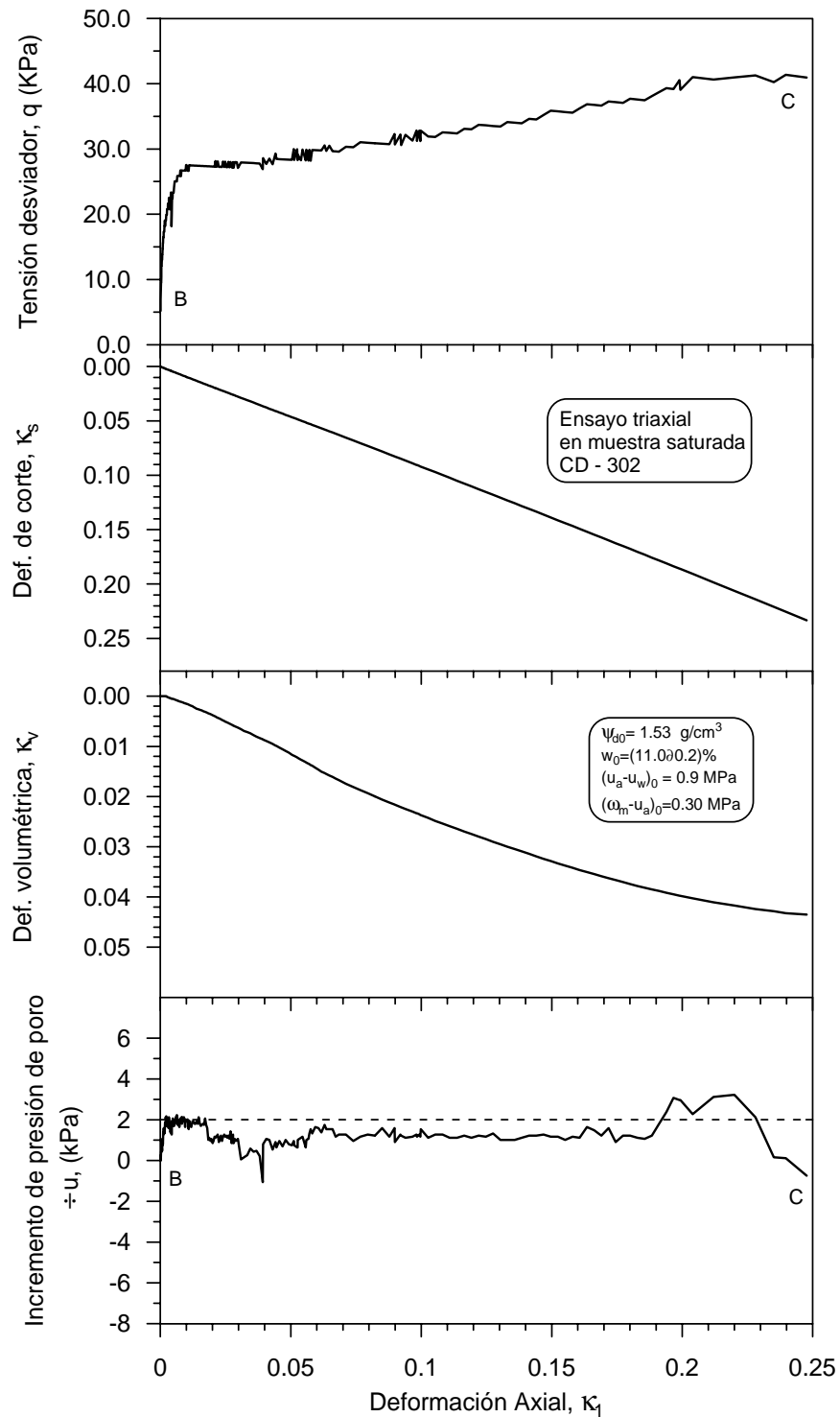


Figura D.9 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\div u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Del plano $q : \kappa_1$ se obtiene el módulo tangente (E). Ensayo CD-302.

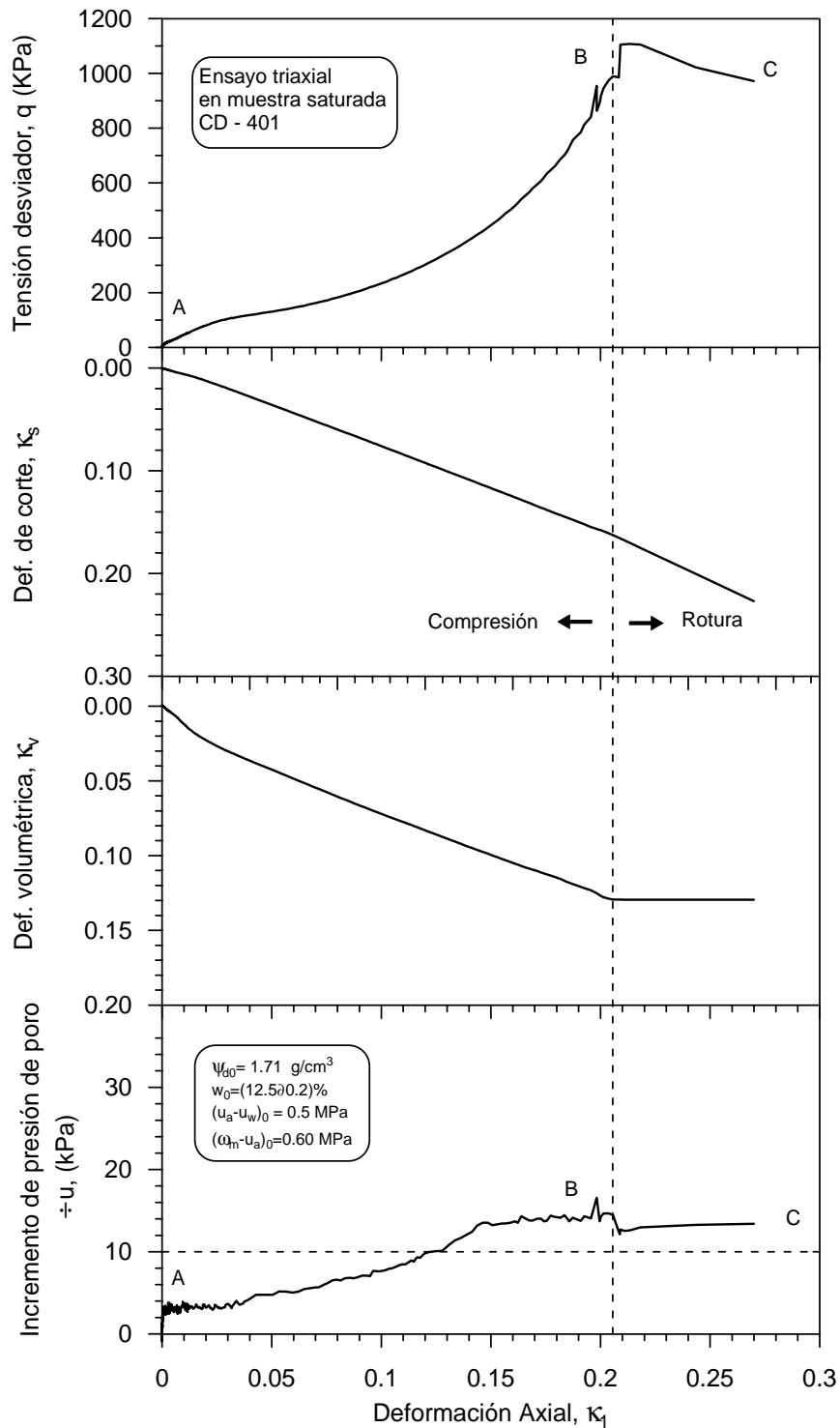


Figura D.11 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (κ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-401).

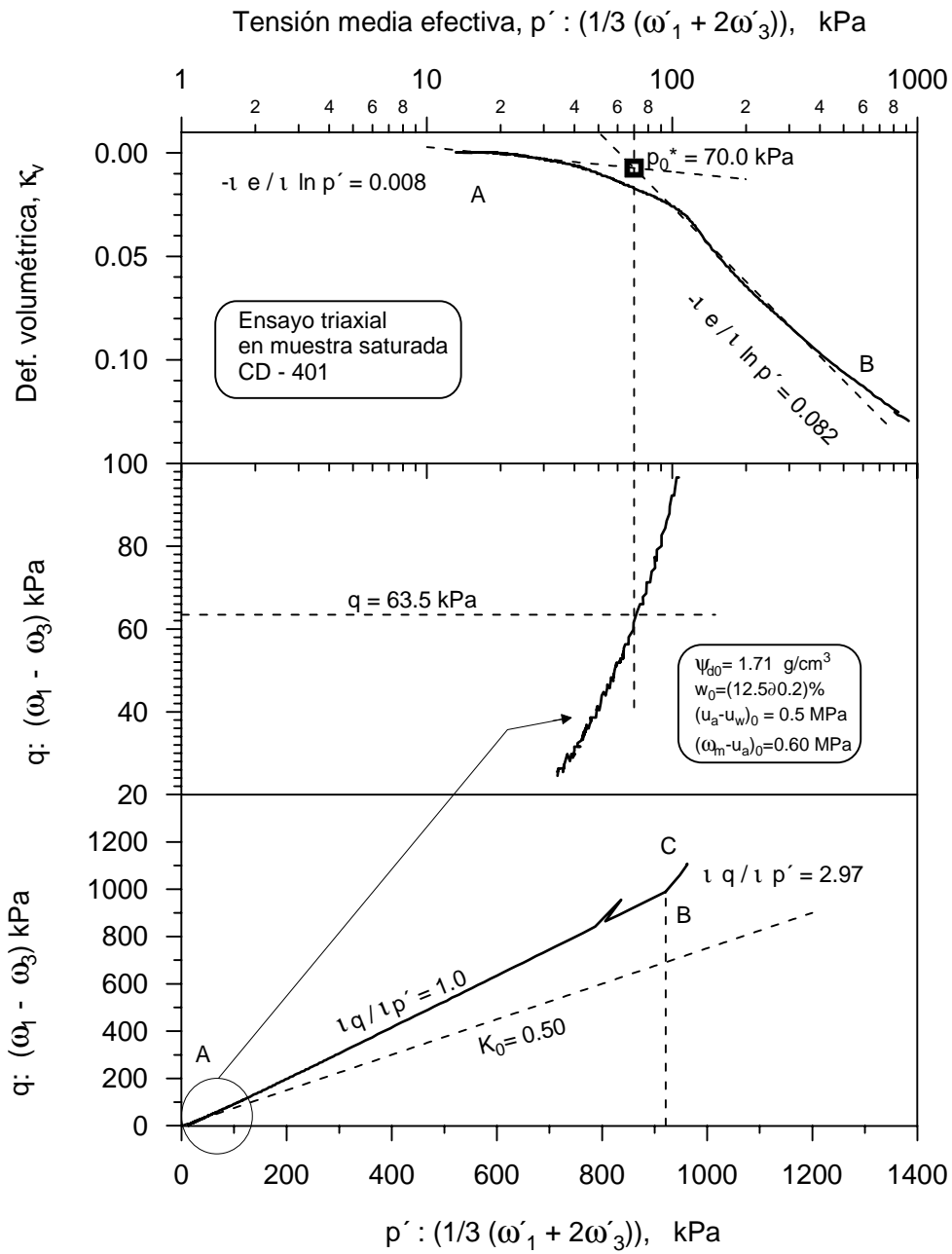


Figura D.12 Esfuerzo medio efectivo & deformación, y esfuerzo desviador (CD-401). Obtención de las coordenadas del punto en la superficie de fluencia (p_0^* , q).

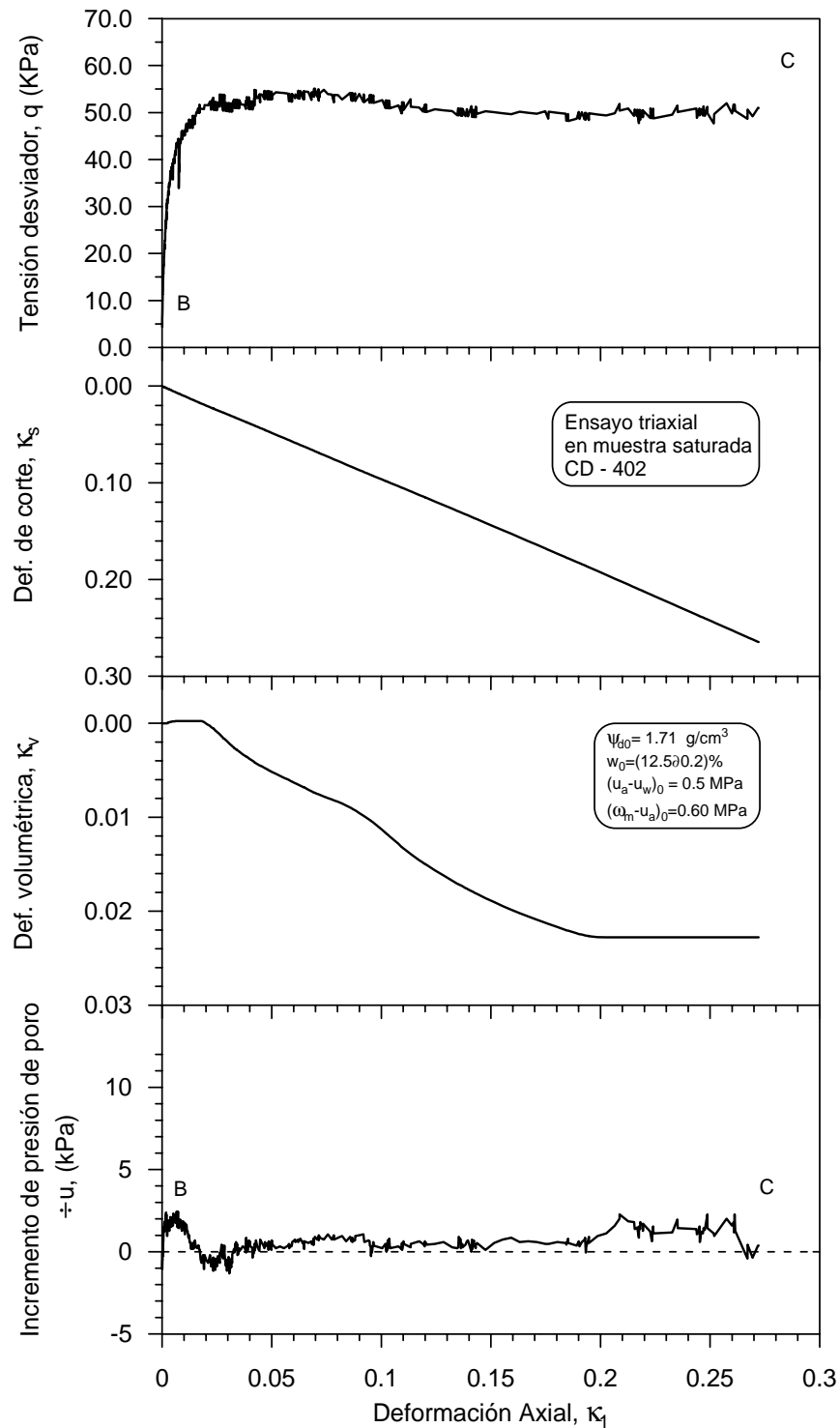


Figura D.13 Variación del esfuerzo desviador (q); deformación de corte (κ_s); deformación volumétrica (κ_v), e incrementos de la presión de poros ($\pm u$) con respecto a la deformación axial (κ_1). Del plano $q : \kappa_1$ se obtiene el módulo tangente (E). Ensayo CD-402.

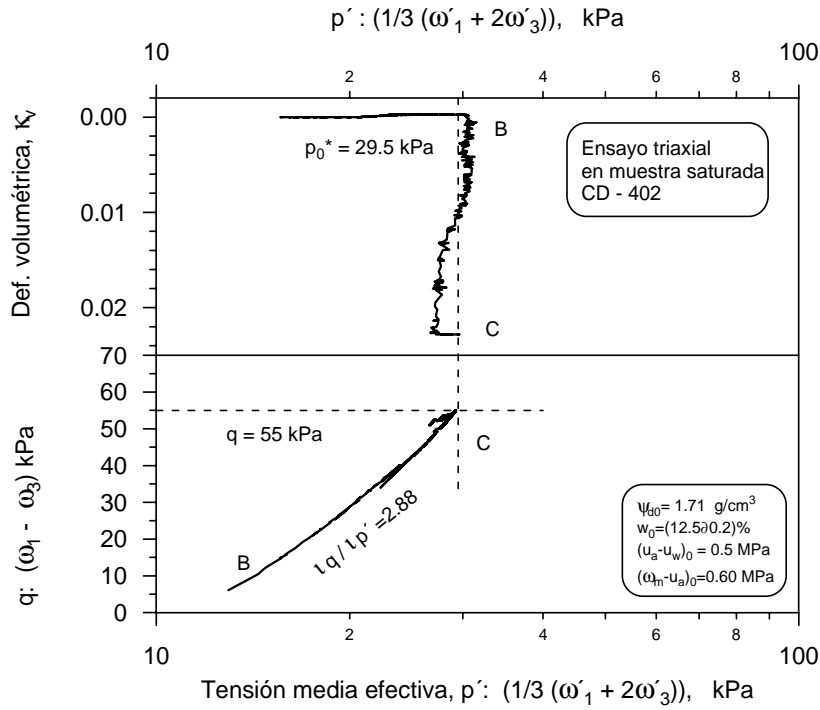


Figura D.14 Esfuerzo medio efectivo & deformación y esfuerzo desviador (CD-402). Obtención de las coordenadas del punto en la superficie de fluencia (p_0^* , q).

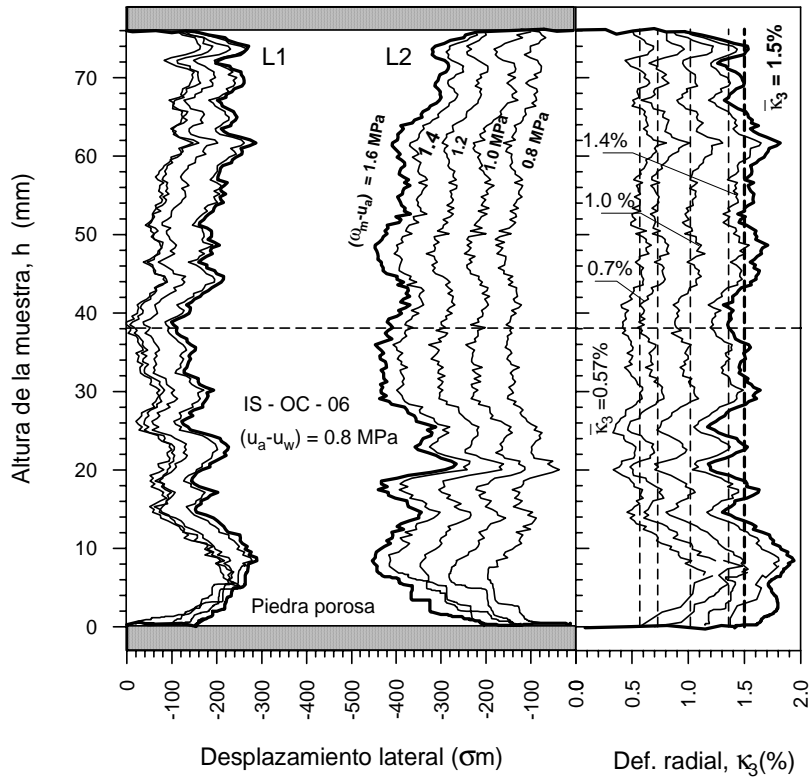


Figura D.15 Perfil de las deformaciones laterales en la trayectoria de carga. Ensayo IS-OC-06.

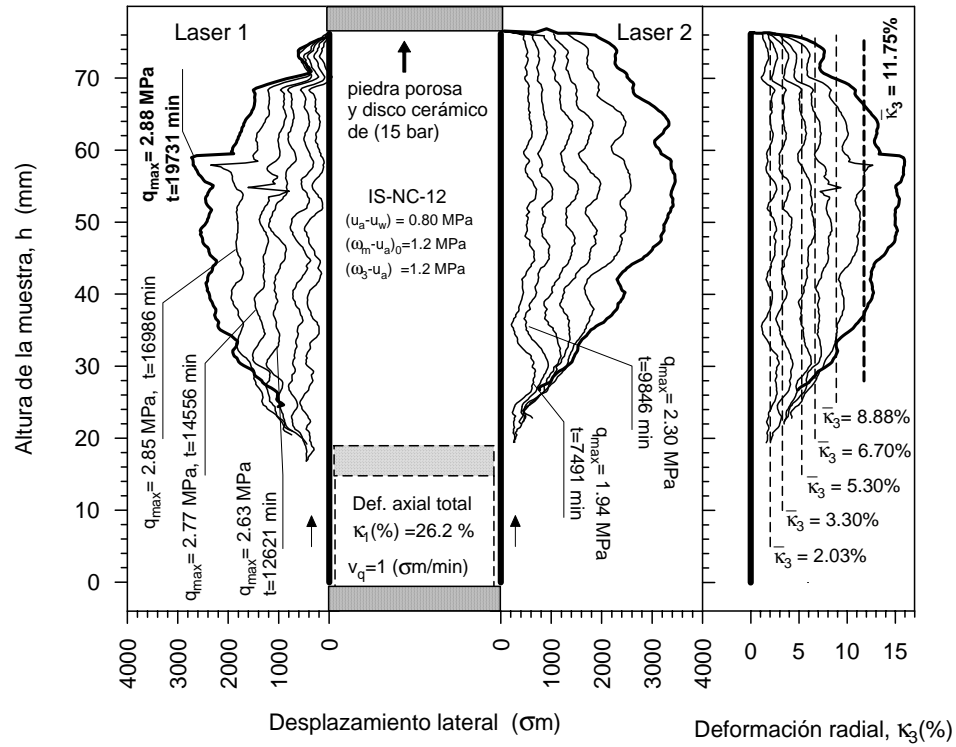


Figura D.16 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8 \text{ MPa}$) del ensayo IS-NC-12.

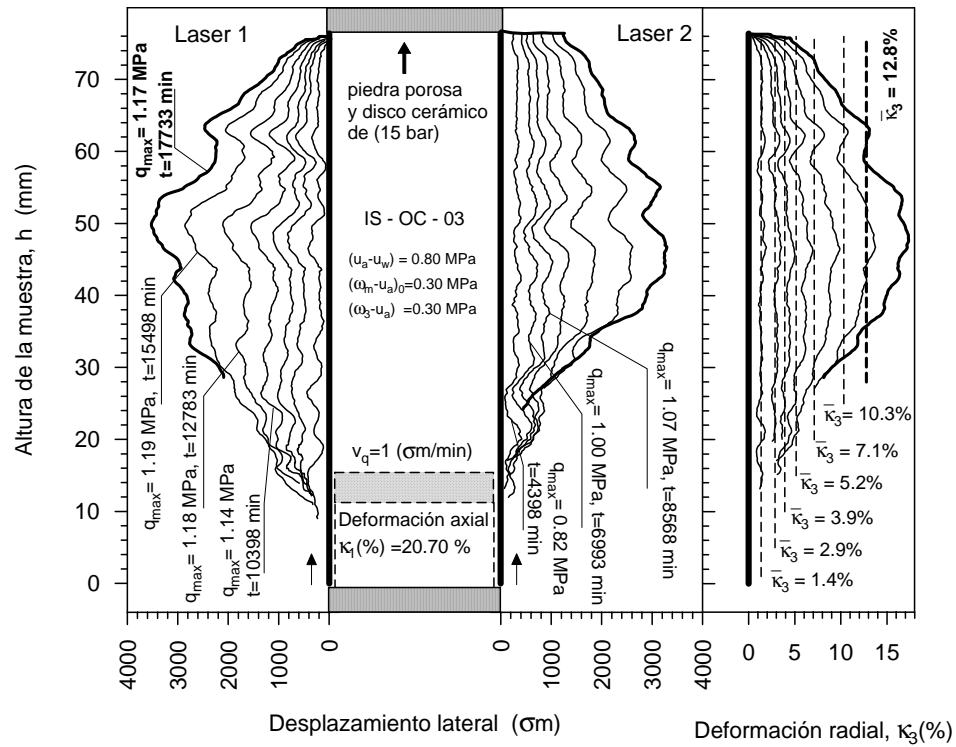


Figura D.17 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8 \text{ MPa}$) del ensayo IS-OC-03.

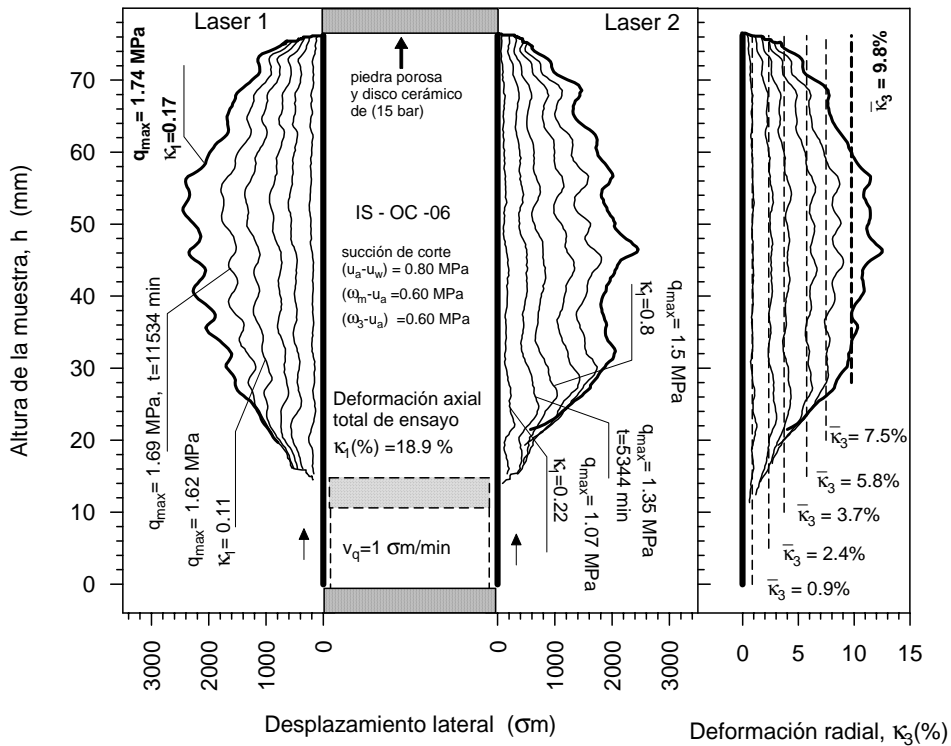


Figura D.18 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IS-OC-06.

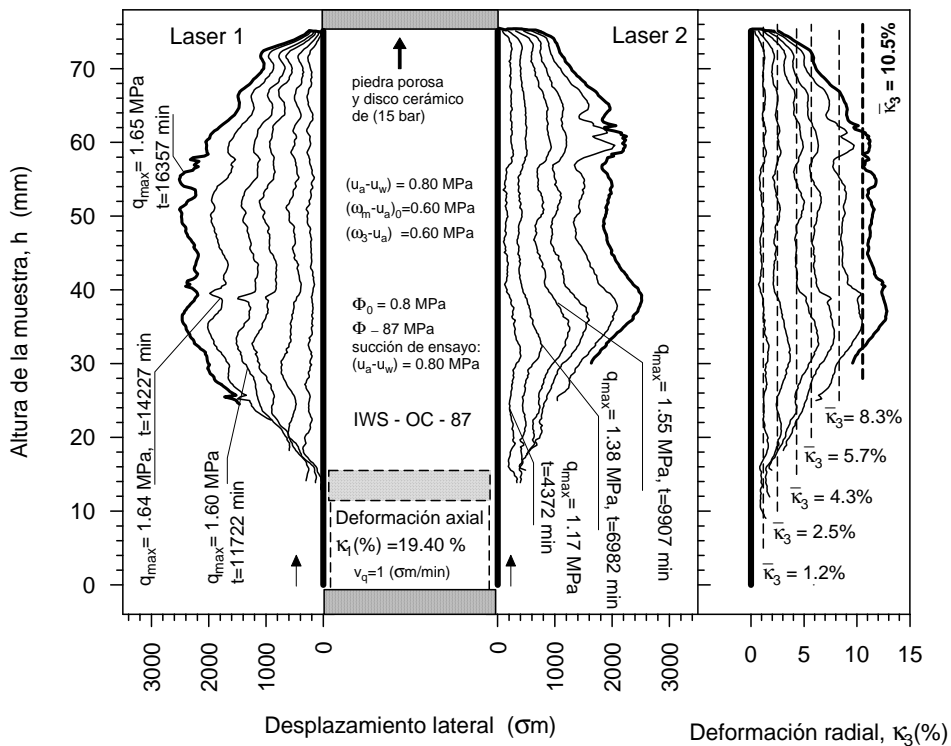


Figura D.19 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IWS-OC-87.

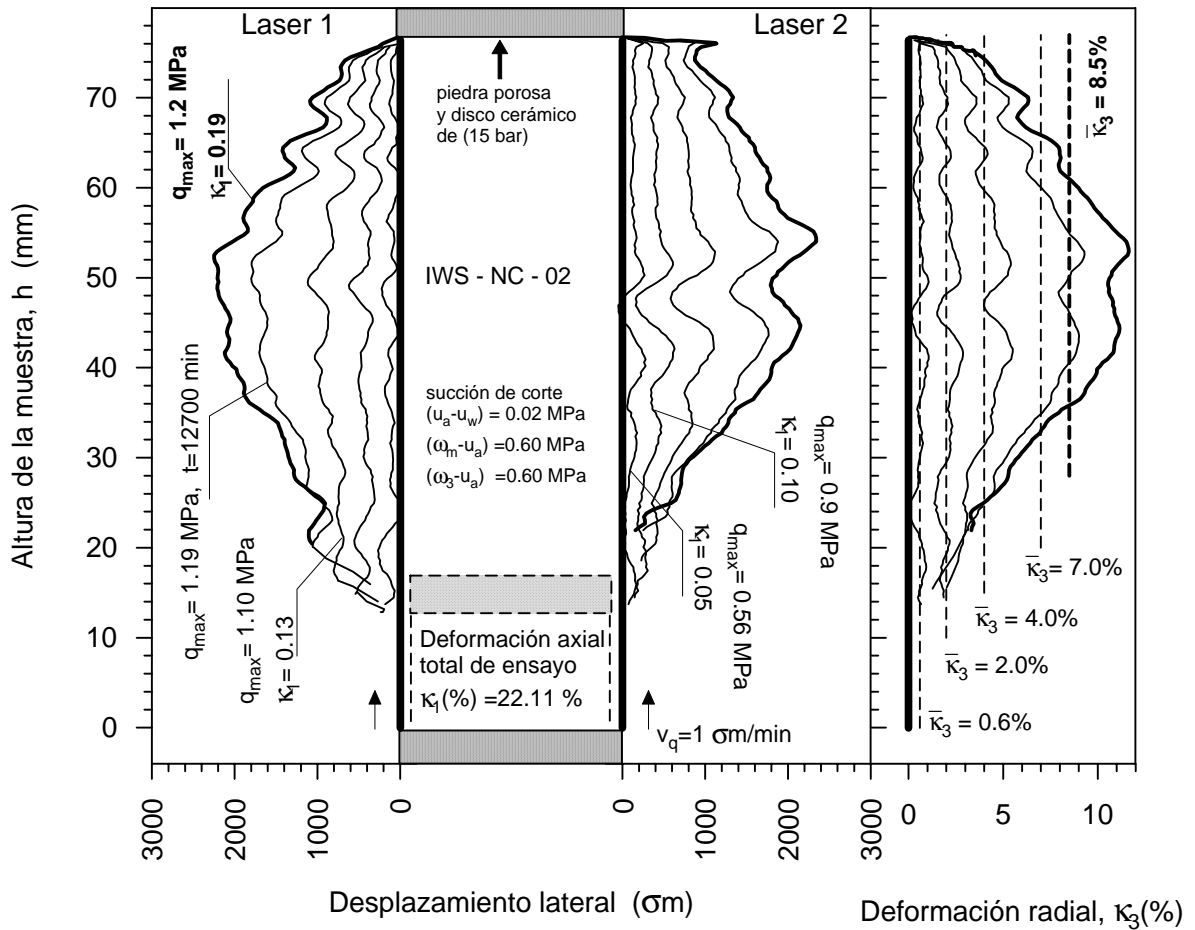


Figura D.20 Perfil de las deformaciones laterales en la etapa de rotura, bajo succión constante ($s = 0.8$ MPa) del ensayo IS-NC-02.

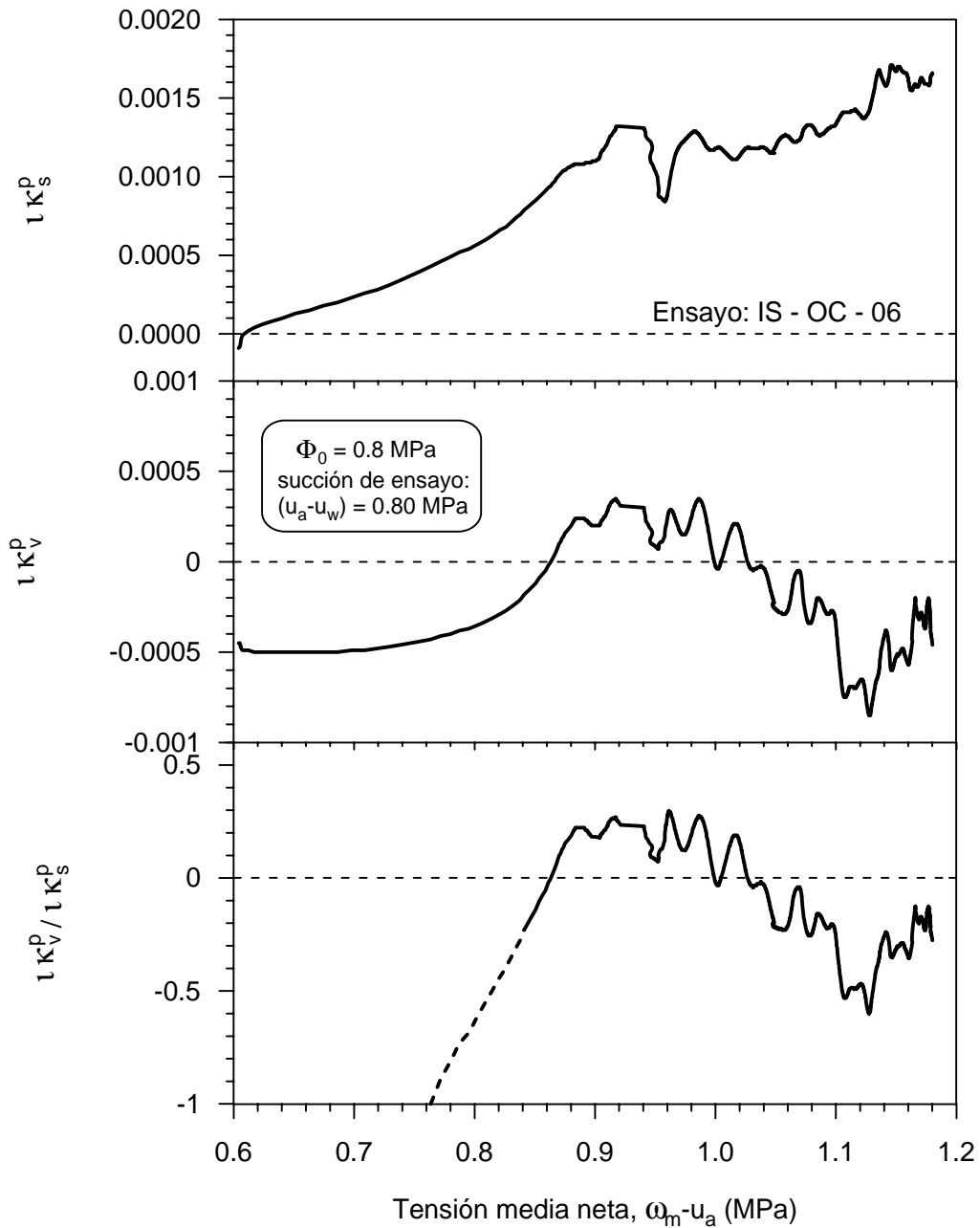


Figura D.21 Variación en la dirección del incremento en las deformaciones plásticas, como una función de p para $q/(p-ua) = 3$, y $s = 0.8 \text{ MPa}$. Ensayo IS-OC-06.

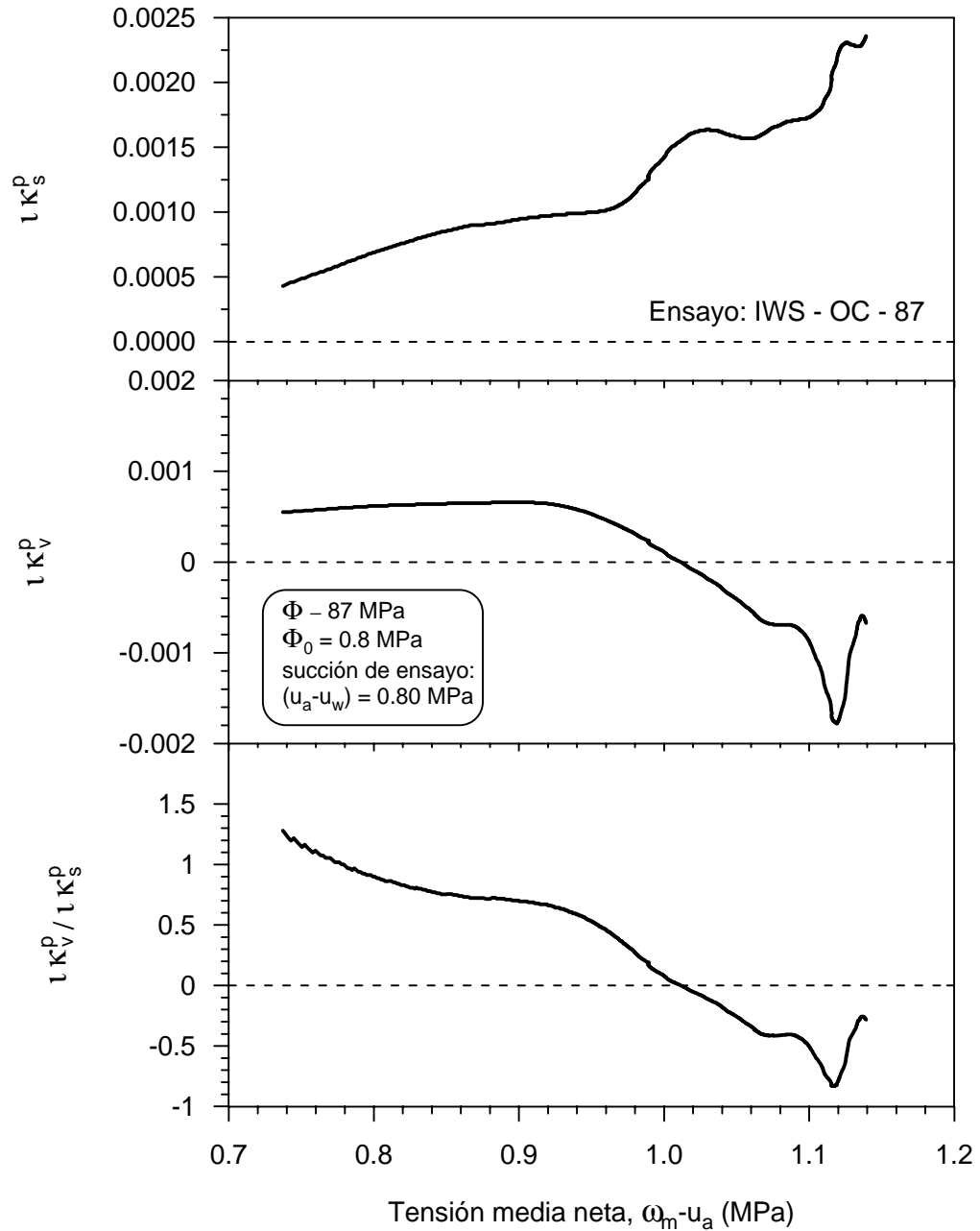


Figura D.22 Variación en la dirección del incremento en las deformaciones plásticas como una función de p para $q/(p-ua) = 3$, y $s = 0.8 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-OC-87.

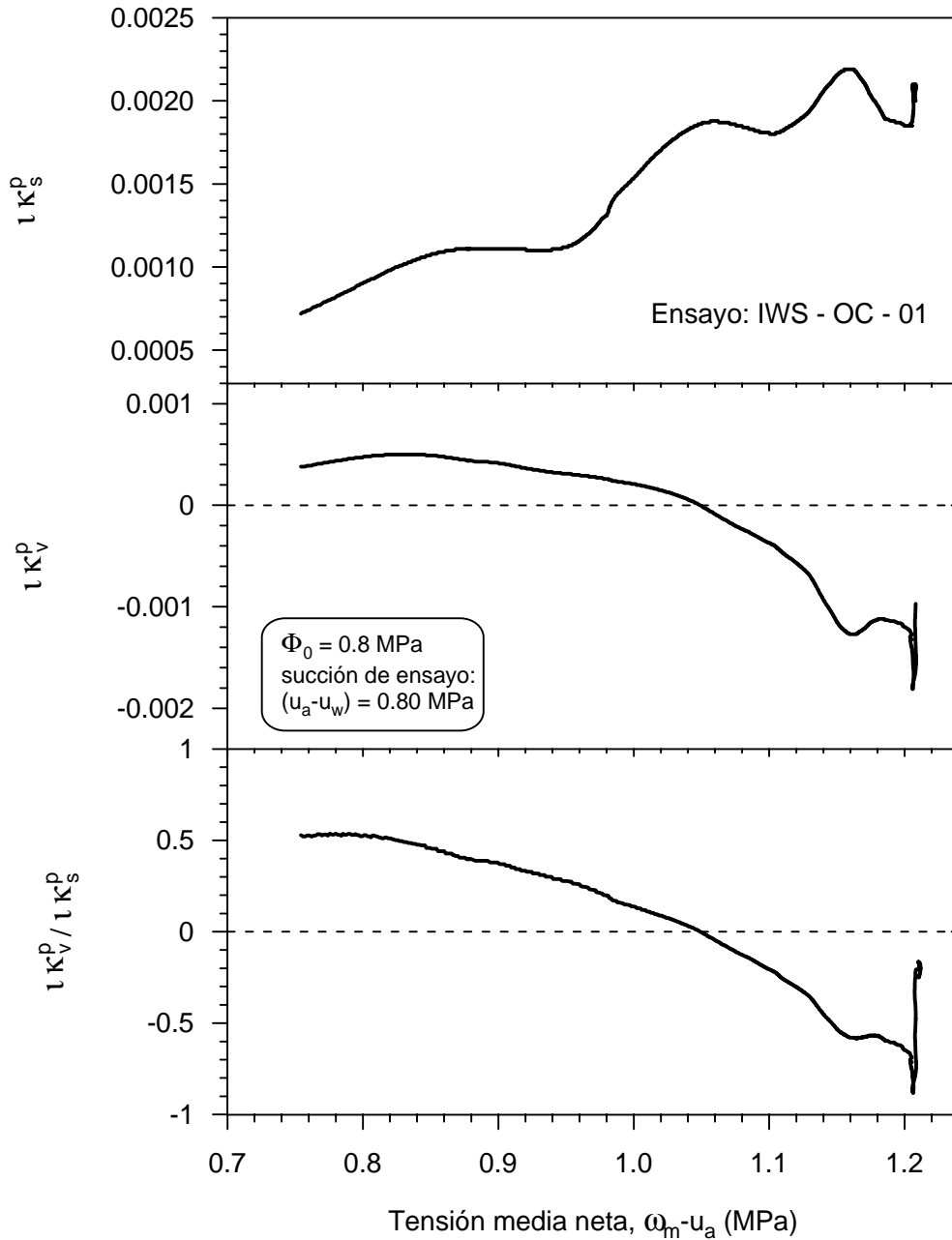


Figura D.23 Variación en la dirección del incremento en las deformaciones plásticas como una función de p para $q/(p-ua) = 3$, y $s = 0.8 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-OC-01.

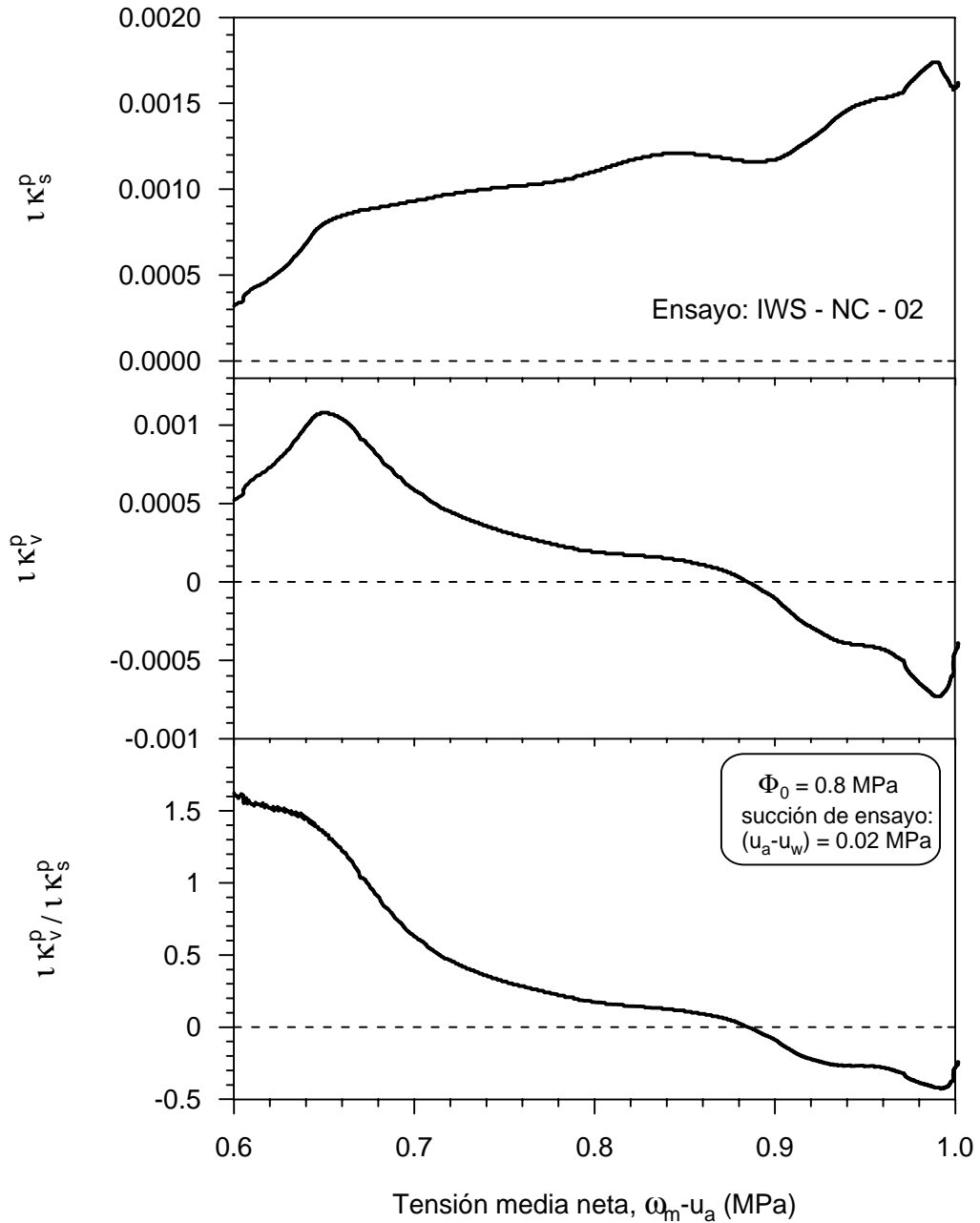


Figura D.24 Variación en la dirección del incremento en las deformaciones plásticas, como una función de p para $q/(p-ua) = 3$, y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IWS-NC-02.

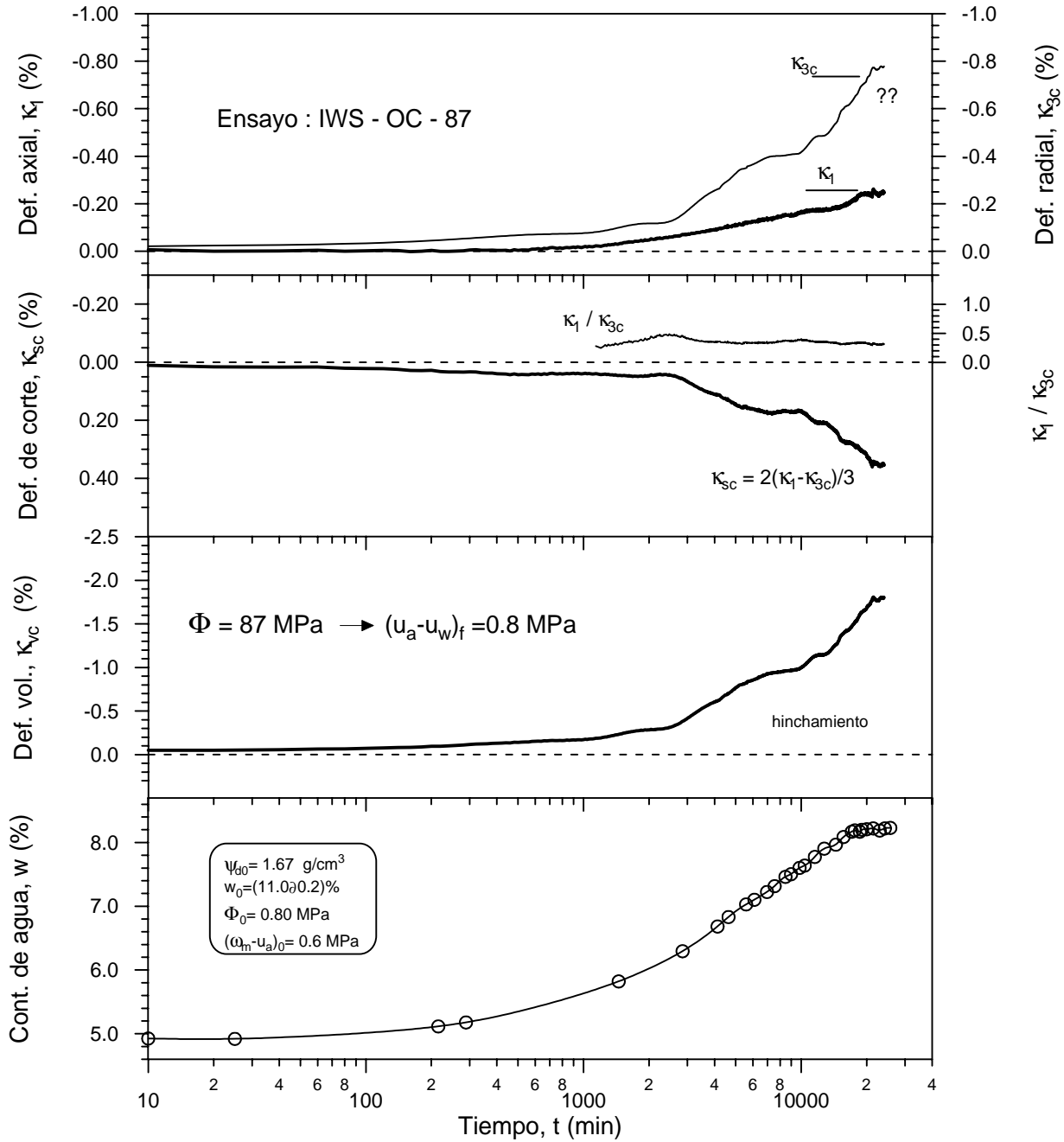


Figura D.25 Evolución en el tiempo de las deformaciones y contenidos de agua en una etapa de humedecimiento: $\Phi = 87 \text{ MPa} \downarrow (u_a - u_w)_f = 0.8 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-OC-87.

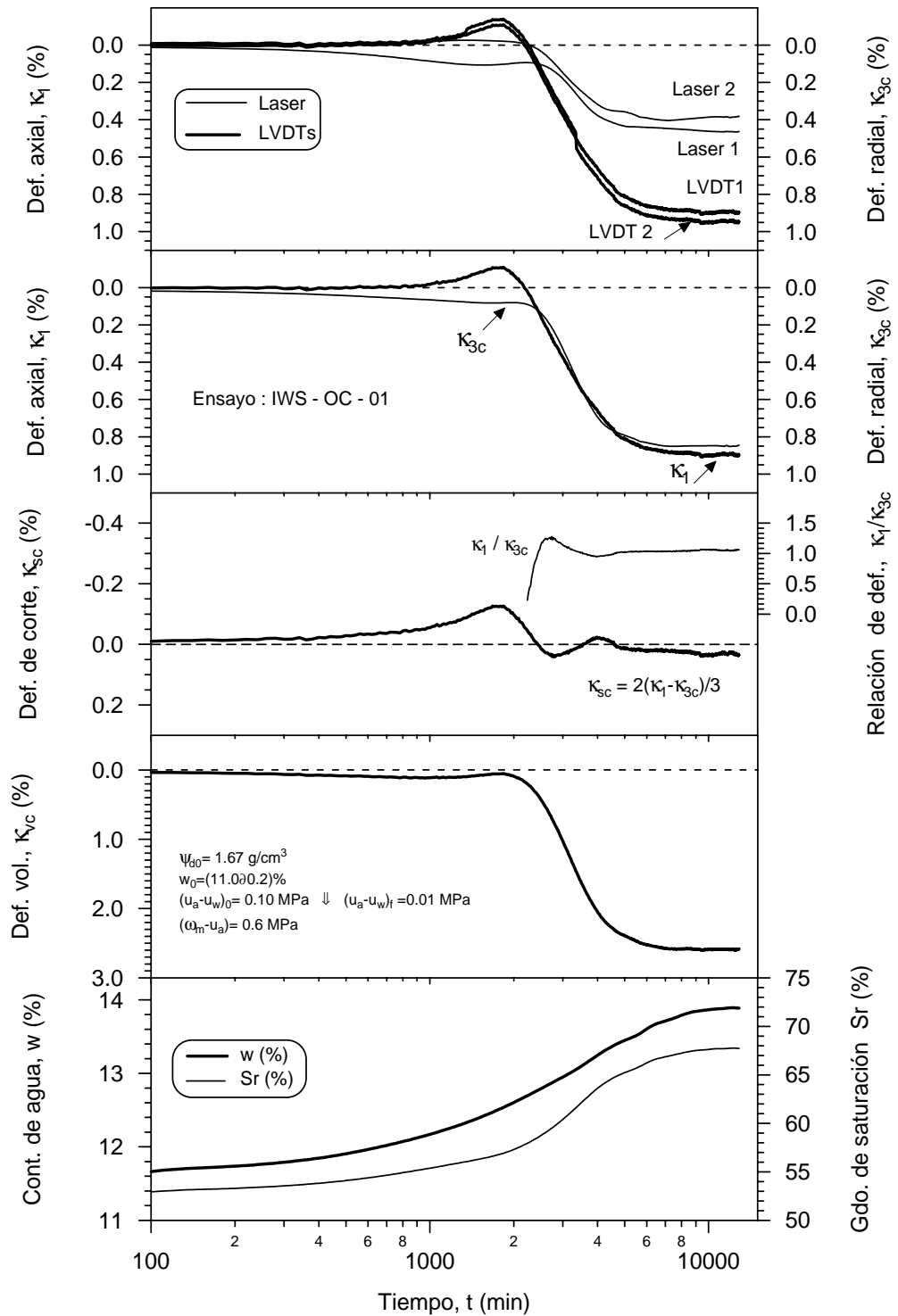


Figura D.26 Evolución en el tiempo de las deformaciones, contenidos de agua y grados de saturación en una etapa de humedecimiento: $(u_a - u_w)_0 = 0.10 \text{ MPa} \Downarrow (u_a - u_w)_f = 0.01 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-OC-01.

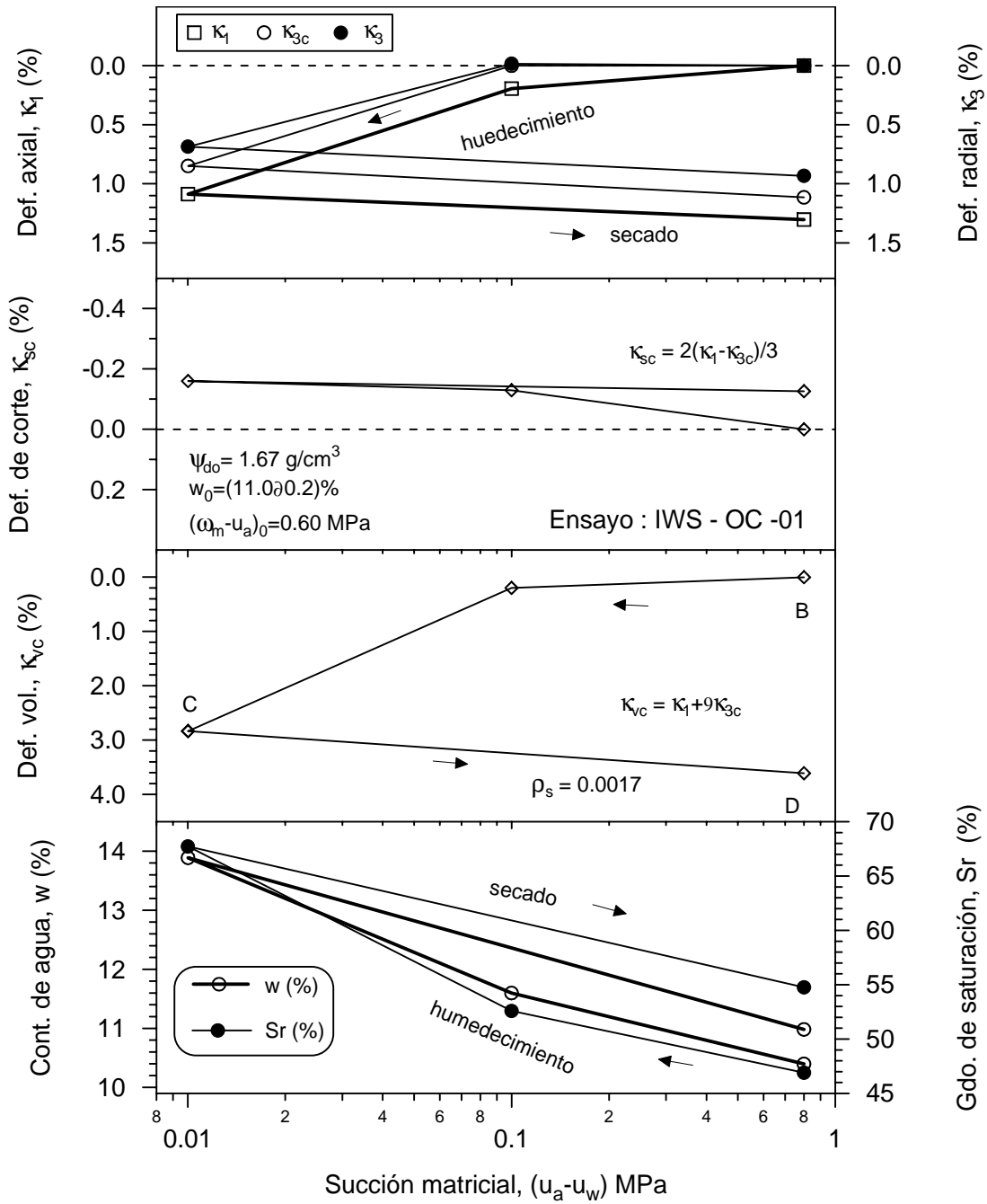


Figura D.27 Variación de la deformación axial, radial, de corte, volumétrica, y cambios en contenidos de agua, y grados de saturación en un ciclo de humedecimiento-secado, bajo esfuerzo medio constante $(\omega_m - u_a) = 0.6 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-OC-01.

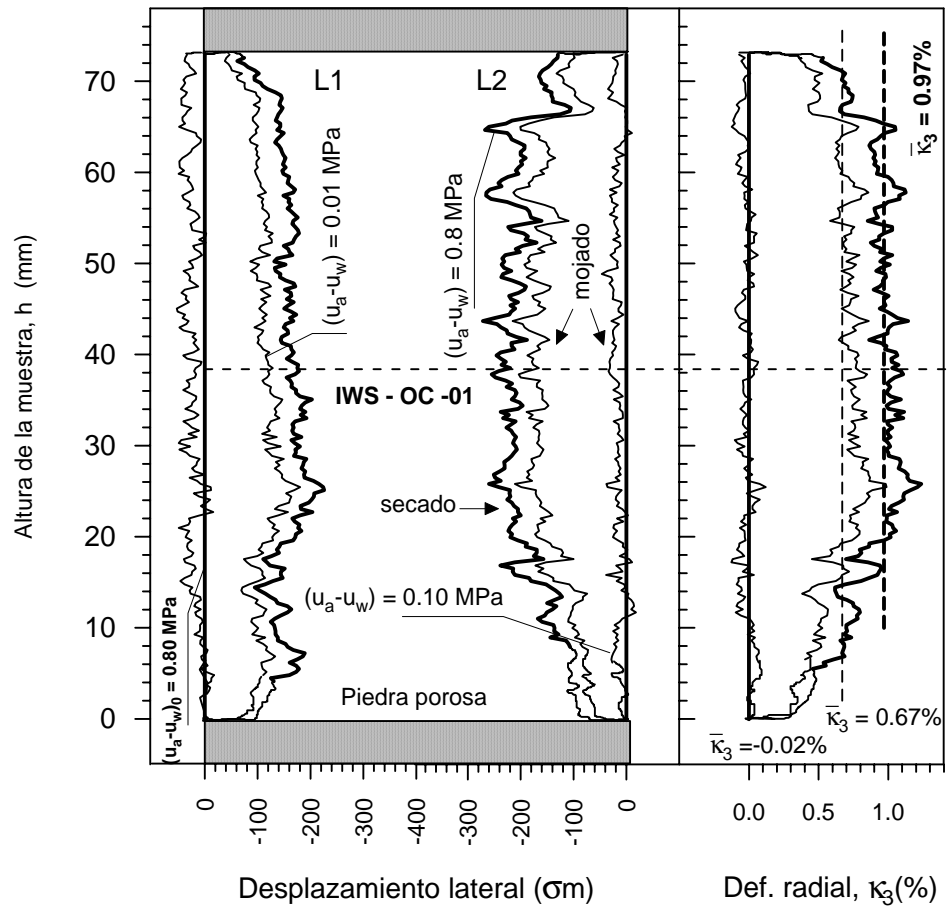


Figura D.28 Perfiles de las deformaciones laterales en las etapas de humedecimiento y secado, bajo esfuerzo medio constante $(\omega_m - u_a) = 0.06 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-OC-01.

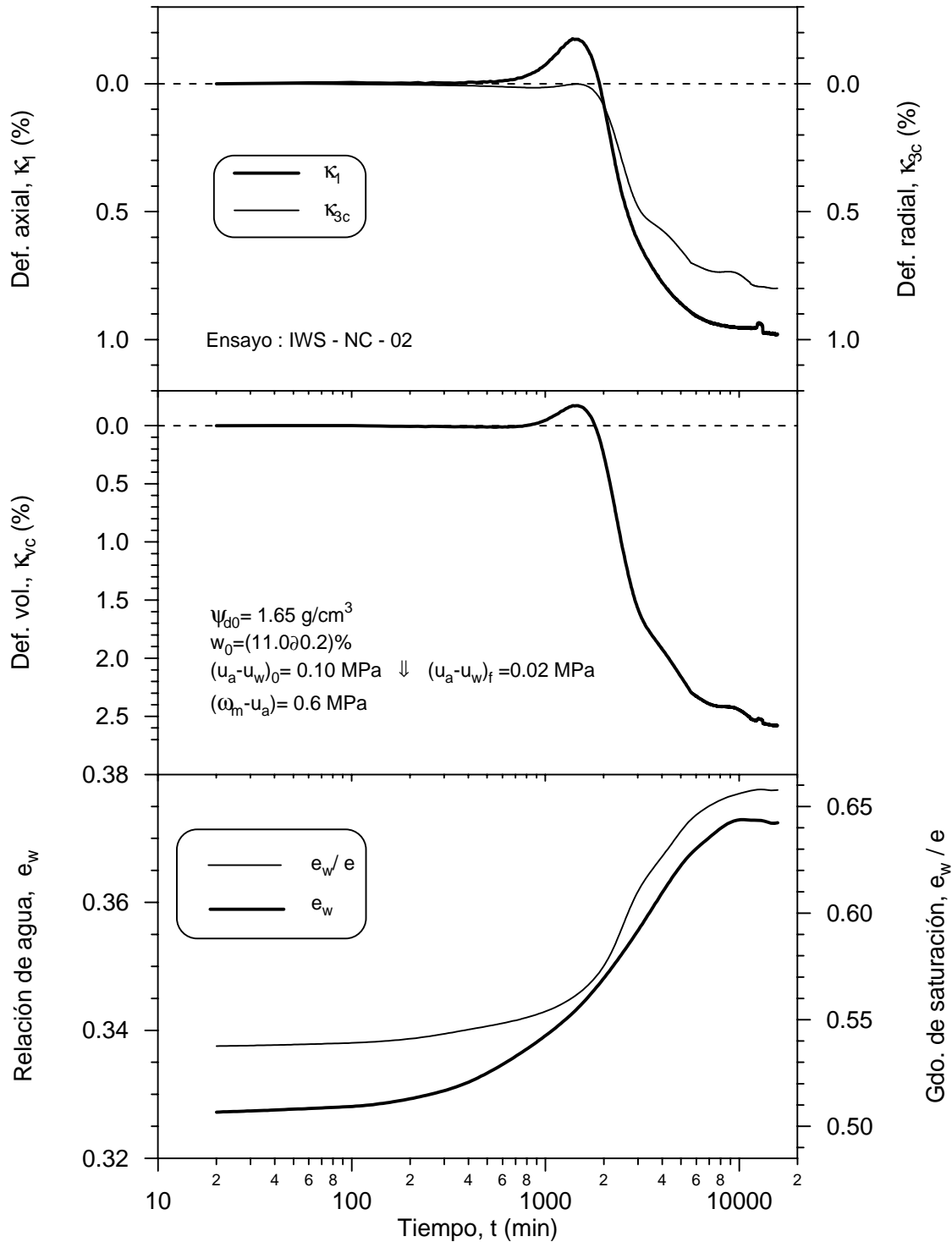


Figura D.29 Evolución en el tiempo de las deformaciones, contenidos de agua y grados de saturación en una etapa de humedecimiento: $(u_a - u_w)_0 = 0.10 \text{ MPa} \Downarrow (u_a - u_w)_f = 0.02 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-NC-02.

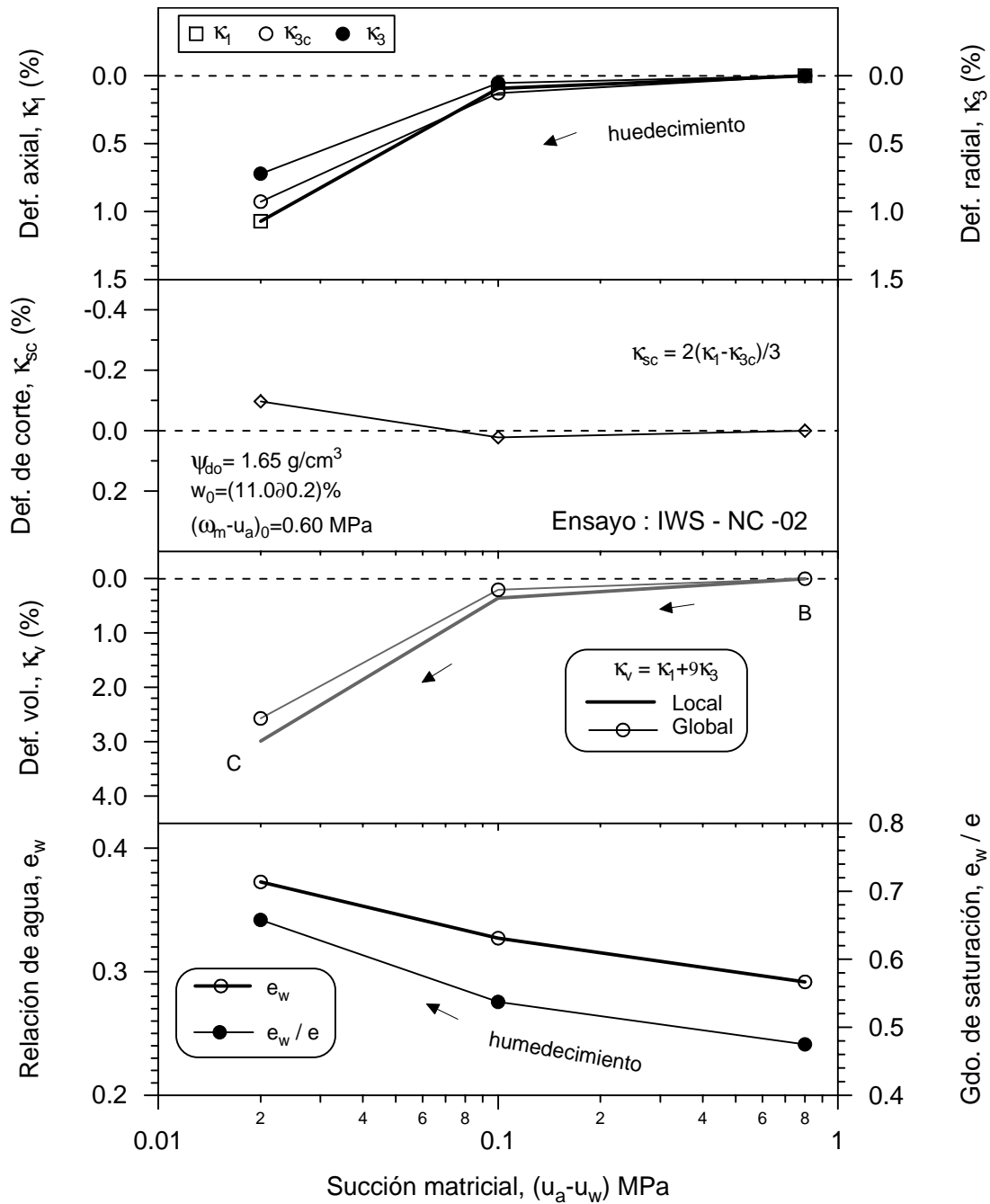


Figura D.30 Variación de la deformación axial, radial, de corte, volumétrica, y cambios en contenidos de agua y grados de saturación con respecto a la succión matricial en una trayectoria de humedecimiento, bajo esfuerzo medio constante $(\omega_m - u_a) = 0.6 \text{ MPa}$. Ensayo IWS-NC-02.

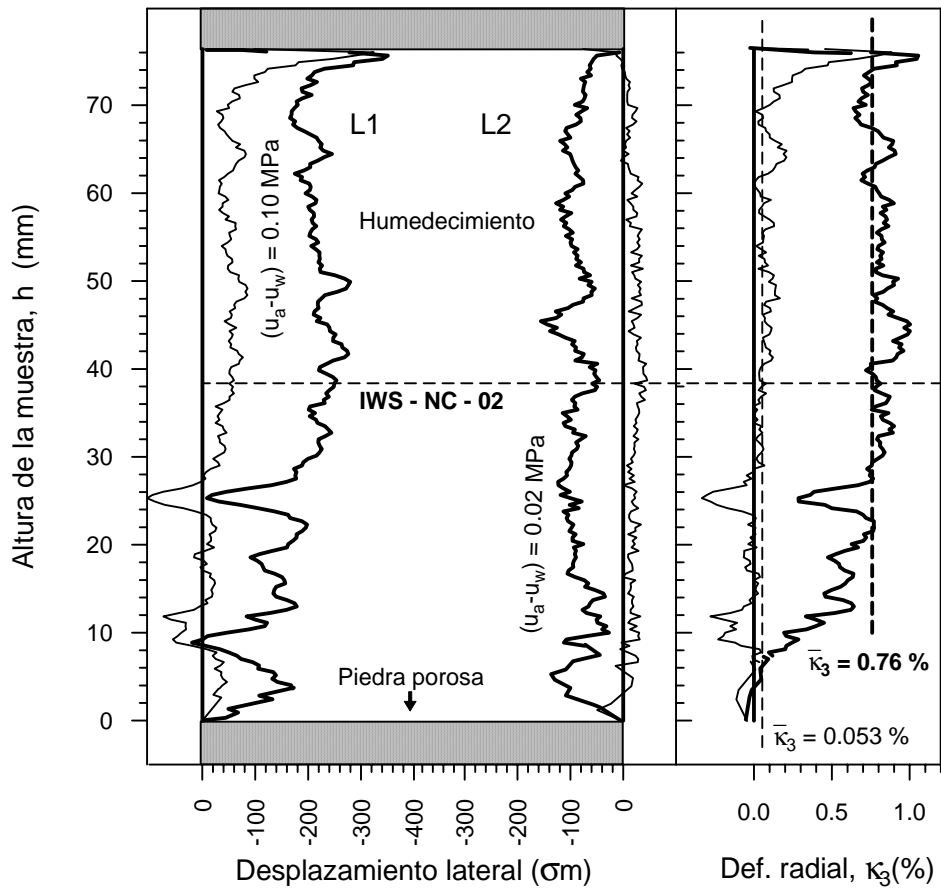


Figura D.31 Perfiles de las deformaciones laterales en las etapas de humedecimiento, bajo esfuerzo medio constante $(\omega_m - u_a) = 0.06$ MPa. Ensayo IWS-NC-02.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel. (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel. (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx