

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Componentes principales de cada una de las fases de un suelo no saturado (Yoshimi y Osterberg, 1963).....	61
Figura 2.2	Estructura de suelos no saturados (Wroth & Houlby, 1985).....	61
Figura 2.3	Estructura del suelo (adaptado de Alonso <i>et al.</i> , 1987).....	62
Figura 2.4	Hinchamiento y colapso para un mismo suelo (Jennings y Kenight, 1975).....	62
Figura 2.5	Máximo colapso según Yudhbir (1982).....	63
Figura 2.6	Variación del hinchamiento y del colapso con la densidad seca y presión aplicada después de inundar (Cox, 1978).....	63
Figura 2.7	Variación del hinchamiento y del colapso después de inundar con la humedad de compactación y la densidad seca (Cox, 1978).....	64
Figura 2.8	Hinchamiento en procesos de compactación al inundar tras secar al aire (Holtz, 1959).....	64
Figura 2.9	Variación del hinchamiento con la densidad seca al compactar a diferentes humedades (Giziensky y Lee, 1965).....	65
Figura 2.10	Expansión y colapso durante el humedecimiento de dos muestras compactadas (Escario y Sáez, 1973).....	65
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).....	66
Figura 2.12	Extensión de la envolvente de falla de Mohr – Coulomb (Fredlund, Morgenstern y Widger, 1978).....	66
Figura 2.13	Resistencia a la falla vs. Succión y tensión normal neta para la arena arcillosa de Madrid (Escario y Sáez, 1986).	67
Figura 2.14	Valor de ϕ^b contra succión (Gan, Fredlund y Rahardjo, 1988).....	67
Figura 2.15	Estructuras de suelos compactados.....	68
Figura 2.16	El efecto del contenido de agua sobre estructuras de suelos compactados (Lambe, 1958).....	68
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).....	69
Figura 2.18	Calibración de la presión osmótica de soluciones de PEG con diferentes masas moleculares (Gens y Romero, 2000).....	70
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).....	70
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).....	71
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.....	72
Figura 2.22	Célula edométrica con control de succión y tensión lateral (Romero, 1999).....	72
Figura 2.23	Célula triaxial modificada para ensayos con suelos parcialmente saturados (Bishop y Donald, 1961).....	73

Figura 2.24	Célula triaxial para suelos no saturados (Carvalho, 2001).....	73
Figura 2.25	Superficies de estado para el índice de vacíos y grado de saturación (Matyas y Radakrishna, 1968).....	74
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.....	74
Figura 2.27	Modelo de estado crítico.....	75
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).....	75
Figura 2.29	Superficie de fluencia asociada a p_0^* (Alonso <i>et al.</i> , 1990).....	76
Figura 2.30	Superficie de fluencia en los planos (p,q) y (s,p)	76
Figura 2.31	Superficie de fluencia del BBM en el espacio (p, q, s)	77
Figura 3.1	Aislador térmico con las sondas psicrométricas en serie.....	107
Figura 3.2a	Parte inferior de la sonda y sus elementos.....	107
Figura 3.2b	La sonda y el aislante térmico.....	108
Figura 3.3	Curvas de calibración para las sondas del Psicrómetro transistor.....	108
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.....	109
Figura 3.5	Triaxial automático (GDS Instruments Ltd).....	109
Figura 3.6	Controlador digital de presión y volumen, utilizados para imponer presión de confinamiento y presión de cola.....	110
Figura 3.7	Edómetro con control de succión matricial (u_a-u_w) y total (Ψ).....	110
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.....	111
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).....	111
Figura 3.10	Esquema de la nueva célula edométrica con control de succión matricial y succión total.....	112
Figura 3.11	Deformación de la célula edométrica con control de succión.....	113
Figura 3.12	Relación teórica entre diafragma o presión del pistón y carga vertical neta transmitida.....	113
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).....	114
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).....	115
Fig. 3.14b	Esquema del montaje del cabezal de la célula triaxial para saturar el disco cerámico.....	115
Figura 3.15	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico (mini-célula isótropa rígida).....	116
Figura 3.16	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua sobre el disco cerámico del cabezal y pedestal (cámara triaxial con succión controlada).....	117
Figura 3.17	Variación de la permeabilidad no saturada en función del grado de saturación al	

	variar la estructura de la arcilla. Ensayos edométricos.....	118
Figura 3.18	Esquema básico de la Mini-célula isótropa rígida con control de succión.....	119
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.....	119
Figura 3.20	Conexiones entre la mini-célula isótropa básica y los equipos complementarios..	120
Fig. 3.21a	Esquema de la Célula triaxial con control de succión.....	121
Fig. 3.21b	Foto de la célula triaxial con control de succión.....	122
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.....	122
Figura 3.23	Esquema del sistema de aplicación de la presión de aire y agua (combinación del disco cerámico (AVEA) y anillo poroso).....	123
Figura 3.24	Cámara y tapa de la célula triaxial con control de succión.....	123
Figura 3.25	Esquema del montaje de los LVDTs miniatura internos.....	124
Figura 3.26	Calibración de los LVDTs miniatura internos.....	124
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.....	125
Figura 3.28	Calibración LVDTs externos (desplazamiento vertical de los sensores láser).....	125
Figura 3.29	Ajuste de la salida de señal eléctrica antes de realizar el programa de calibración de los sensores láser.....	126
Figura 3.30	Deformación de la cámara de metacrilato bajo presiones de confinamiento.....	127
Figura 3.31	Sensibilidad de los sensores láser bajo diferentes presiones de confinamiento.....	127
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.....	128
Figura 3.33	Relación entre velocidad del motor reductor y el desplazamiento del pistón de carga.....	129
Figura 3.34	Expresión teórica y experimental entre σ_1 y σ_p . Factor de sensibilidad de la señal en (mV) de la célula de carga a fuerza (kN).....	129
Figura 3.35	Comparación entre datos teóricos y experimentales.....	130
Figura 3.36	Fotografía de la célula de carga (SENSOTEC; capacidad 8.9 kN).....	130
Figura 3.37	Estabilidad de la célula de carga (mV) bajo cambios de presión de cámara.....	131
Figura 4.1	Esquema geológico de la ciudad de Barcelona (Vázquez-Suñé, E. 1998).....	165
Figura 4.2	Difracción de rayos – X de la arcilla de Barcelona.....	165
Figura 4.3	Microscopio electrónico de barrido ambiental Electroscan 2020 (ESEM).....	166
Figura 4.4a	Suelo compactado en condiciones isótropas ($\rho_d=1.65\text{g/cm}^3$, $w_0=11\pm 0.2\%$ y $n=40\%$), aumento x1000.....	166
Figura 4.4b	Aumento de la Fig. 4.4a x 3000, agregados de partículas.....	167
Figura 4.4c	Estructura del suelo colapsado bajo inundación ($\rho_d=1.53\text{ g/cm}^3$, $w= 8.0\%$ y $n=42\%$).....	167
Figura 4.4d	Estructura de suelo colapsado bajo el proceso de hidratación por etapas ($\rho_d=1.53\text{ g/cm}^3$, $w=8.0\%$ y $n=42\%$).....	168
Figura 4.5	Porosímetro por intrusión de mercurio (Micromeritics).....	168
Figura 4.6	Intrusión acumulada de la relación de vacíos.....	169
Figura 4.7	Distribución del tamaño de poros para diferentes condiciones.....	169
Figura 4.8	Distribución de tamaños de partículas del suelo para diferentes condiciones (MIP).....	170

Figura 4.9	Superficie específica para diferentes condiciones usando la técnica MIP.....	170
Figura 4.10	Curva granulométrica para el suelo en estudio (CL de Barcelona).....	171
Figura 4.11	Carta de plasticidad.....	171
Figura 4.12	Curvas de compactación para diferentes niveles de energía específica.....	172
Figura 4.13	Procedimiento de compactación estática isótropa (tensión controlada).....	173
Figura 4.14	Fotografías de las etapas del procedimiento de compactación isótropa.....	173
Figura 4.15	Curvas de compactación para tres tensiones isótropas (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.....	174
Figura 4.16	Comprobación del tiempo de aplicación de la presión isótropa y la disipación del exceso de la presión generada en los poros.....	175
Figura 4.17	Moldes cilíndricos utilizados para la fabricación de probetas en la primera etapa de la compactación estática en condiciones isótropas.....	175
Figura 4.18	Técnica de preparación de las muestras a ensayar ($\phi=38$ mm, $h=76$ mm).....	176
Figura 4.19	Relación entre la succión total (Ψ) y contenido de agua (w), para diferentes densidades secas (ρ_d) a porosidad constante (Técnica Psicrométrica).....	176
Figura 4.20	Curva de retención (succión vs. grado de saturación) a porosidad constante.....	177
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)..	177
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 isótropa en muestras saturadas.....	178
Figura 4.23	Trayectoria de tensión y succión, en los ensayos de carga isótropa y de colapso bajo inundación a carga constante, (ejemplo ensayo B1).....	179
Figura 4.24	Deformación de colapso para diferentes valores de carga vertical aplicada.....	179
Figura 4.25	Colapso en función de la densidad seca en el momento de la inundación para muestras con la misma humedad inicial (11%).....	180
Figura 4.26	Influencia de la succión inicial total (ψ) en la deformación de colapso.....	180
Figura 4.27	Variación de la deformación volumétrica en las trayectorias de carga, saturación y descarga, para los ensayos A1a y B1a.....	181
Figura 4.28	Variación de la deformación volumétrica, contenidos de agua y grados de saturación bajo tensión vertical neta constante.....	181
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.....	182
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.....	183
Figura 4.31	Relación porosidad – permeabilidad al agua. Ensayos de colapso.....	183
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.).....	184
Figura 4.33	Simulación de la evolución de la trayectoria de carga en los ensayos de colapso sin control de succión (Grupo B).....	184
Figura 4.34	Relación entre el índice de poros – tensión vertical neta, succión matricial – tensión vertical neta 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).....	185
Figura 4.35	Deformación de colapso para diferentes valores de densidad seca.....	186
Figura 4.36	Ensayos de compresión isótropa drenados en muestras saturadas.....	186

Figura 4.37	Deformación temporal de la muestra para diferentes incrementos de tensión efectiva.....	187
Figura 4.38	Obtención de la presión de preconsolidación en muestras saturadas p_0^* (ensayo de compresión isótropa).....	187
Fig. 4.39a	Superficies de fluencia en los ensayos de compresión isótropa en muestras saturadas de los ensayos 1 y 5.....	188
Fig. 4.39b	Reproducción mediante un modelo numérico de los ensayos de compresión isótropa 1 y 5.....	188
Fig.4.39c	Curva experimental versus la curva predicha de los ensayos de colapso bajo inundación a carga constante. Ensayos B1 y C4.....	189
Fig. 4.39d	Deformación de colapso medidas y predichas.....	189
Figura 4.40	Condiciones iniciales de las muestra. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (CD) realizados en la célula triaxial GDS instrument Ltd.....	190
Figura 4.41	Trayectoria de tensión realizada para alcanzar el estado saturado de las muestras de los ensayos triaxiales (GDS instrument Ltd.).....	190
Figura 4.42	Trayectoria de tensión 1. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (GDS).....	191
Figura 4.43	Trayectoria de tensión 2. Ensayos triaxiales en muestras saturadas (GDS).....	191
Figura 4.44	Trayectoria de tensión 3 del ensayo triaxial CD-103.....	192
Figura 4.45	Trayectoria de tensión 4 del ensayo triaxial CD-104.....	192
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.....	193
Figura 4.47	Variación de la tensión desviadora (q), deformación de corte (ϵ_s), deformación volumétrica (ϵ_v) e incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (ϵ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-101).....	194
Figura 4.48	Tensión media efectiva : deformación y tensión desviadora en la etapa de rotura (CD-101). Obtención de las coordenadas del punto de la superficie de fluencia (p_0^* , q).....	194
Figura 4.49	Variación de la tensión desviadora (q), deformación de corte (ϵ_s), deformación volumétrica (ϵ_v) e incrementos de la presión de poros (Δu) con respecto a la deformación axial (ϵ_1). Ensayo triaxial en una muestra saturada (CD-102).....	196
Figura 4.50	Tensión media efectiva : deformación y tensión desviadora en la etapa de rotura (CD-102). Obtención de las coordenadas del punto de la superficie de fluencia (p_0^* , q).....	197
Figura 4.51	Tensión media efectiva 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).....	197
Figura 4.52	Variación de los módulos elásticos con respecto a la presión de confinamiento (σ_3).....	198
Figura 4.53	Superficie de fluencia simétrica / elíptica en el plano $p': q$ (modelo Cam-Clay)...	198
Figura 4.54	Obtención de la tensión de preconsolidación (p_0^*) del ensayo CD-103.....	199
Figura 4.55	Obtención de los parámetros del suelo, tensión de preconsolidación (p_0^*) y parámetros de compresibilidad ($\lambda(0)$, κ) del ensayo CD-104.....	199
Figura 5.1	Condiciones iniciales de los ensayos edométricos con control de succión. Nueva célula edométrica con control de succión.....	225
Figura 5.2	Trayectoria tensional realizada en el ensayo edométrico EDO-1.....	225

Figura 5.3	Trayectoria tensional realizada en el ensayo edométrico EDO-2.....	226
Figura 5.4	Trayectoria tensional realizada en el ensayo edométrico EDO-3.....	226
Figura 5.5	Trayectoria tensional realizada en el ensayo edométrico EDO-4.....	227
Figura 5.6	Trayectoria de tensiones. Ensayos isótopos ISO-1 y ISO-2 (mini-célula isótropa rígida).....	227
Figura 5.7	Condiciones iniciales de las probetas fabricadas de los ensayos: a) isótopos realizados en la mini-célula isótropa rígida; b) ensayos isótopos realizados con el equipo triaxial con control de succión. Curvas de compactación estática en condiciones isótopas con contornos de igual succión.....	228
Figura 5.8	Trayectorias tensionales de los ensayos isótopos ISOW (mini-célula isótropa rígida). ($r = 10 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$: $h/r = 2$).....	229
Figura 5.9	Trayectoria tensional. Ensayo isótropo realizado en la célula Triaxial con control de succión. ($r = 19 \text{ mm}$, $h = 76$: $h/r = 4$).....	229
Figura 5.10	Estado inicial de las muestras para los dos grupos de ensayos de compresión triaxial a variación de deformación constante ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$) en <i>muestras no saturadas (IS, IWS)</i> realizados en la célula triaxial con control de succión.....	230
Figura 5.11	Trayectoria tensional ensayo (IS-OC-03) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma_3 - u_a = 0.3 \text{ MPa}$).....	230
Figura 5.12	Trayectoria tensional ensayo (IS-NC-06) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma_3 - u_a = 0.6 \text{ MPa}$).....	231
Figura 5.13	Trayectoria tensional ensayo (IS-NC-12) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma_3 - u_a = 1.2 \text{ MPa}$).....	231
Figura 5.14	Evolución de los ensayos para la determinación de la línea de estado crítico para un valor en particular de succión ($u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$).....	232
Figura 5.15	Trayectoria tensional ensayo (IS-OC-06) de compresión triaxial a deformación controlada ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma_3 - u_a = 06 \text{ MPa}$).....	232
Figura 5.16	Trayectoria de tensiones para el ensayo IWS-OC-01 ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma_3 - u_a = 06 \text{ MPa}$).....	233
Figura 5.17	Trayectoria de tensiones para el ensayo IWS-NC-02 ($v_q = 1 \mu\text{m}/\text{min}$, $u_a - u_w = 0.8 \text{ MPa}$, $\sigma_3 - u_a = 06 \text{ MPa}$).....	233
Figura 5.18	Transferencia de vapor asociada a la succión total ($\Psi \approx 87 \text{ MPa}$) 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.....	234
Figura 5.19	Trayectoria tensional del ensayo de compresión triaxial (IWS-OC-87). Succión total ($\Psi = 87 \text{ MPa}$) por transferencia de vapor (disolución salina saturada $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).....	235
Figura 6.1	Trayectorias tensionales de humedecimiento–secado y carga–descarga realizados en el ensayo EDO-1. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables tensionales y volumétricas conjugadas).....	293
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.....	294
Figura 6.3	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación durante la trayectoria de humedecimiento (C→D) bajo carga vertical constante ($\sigma_v - u_a = 0.6 \text{ MPa}$. Ensayo EDO-1.....	295

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 tensionales de humedecimiento-secado y carga-descarga del Ensayo EDO-1.....	296
Figura 6.5	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de la trayectoria de carga (E→F) bajo succión matricial constante (u_a-u_w)=0.3 MPa. Ensayo EDO-1.....	297
Figura 6.6	Evolución temporal de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de la trayectoria de descarga (F→G) bajo succión matricial constante (u_a-u_w)=0.3 MPa. Ensayo EDO-1.....	298
Figura 6.7	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos de la tensión vertical neta en los ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , σ_v-u_a), ensayo EDO-1.....	299
Figura 6.8	Trayectorias tensionales de humedecimiento – secado y carga – descarga realizados en el ensayo EDO-2. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables tensionales y volumétricas conjugadas).....	300
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.....	301
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 (σ_v-u_a)=0.6 MPa. Ensayo EDO-2.....	302
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 tensionales de humedecimiento – secado y carga – descarga del Ensayo EDO-2.....	303
Figura 6.12	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos de la tensión vertical neta en los ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , σ_v-u_a), ensayo EDO-2.....	304
Figura 6.13	Trayectorias tensionales de humedecimiento – secado y carga – descarga realizados en el ensayo EDO-3. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables tensionales y volumétricas conjugadas).....	305
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.....	306
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 (σ_v-u_a)=0.3 MPa. Ensayo EDO-3.....	307
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 tensionales de humedecimiento – secado y carga – descarga del ensayo EDO-3.....	308
Figura 6.17	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos de la tensión vertical neta en los ciclos de carga-descarga y humedecimiento-secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , σ_v-u_a), ensayo EDO-3.....	309
Figura 6.18	Trayectorias tensionales de humedecimiento – secado y carga – descarga en el ensayo EDO-4. Representación en un diagrama múltiple SWEP (variables tensionales y volumétricas conjugadas).....	310
Figura 6.19	Variación de la deformación volumétrica, relación de agua y grado de saturación de las diferentes etapas de equilibrio, ensayo EDO-4.....	311

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 (σ_v-u_a)=0.6 MPa. Ensayo EDO-4.....	312
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 tensionales de humedecimiento – secado y carga – descarga del ensayo EDO-4.....	313
Figura 6.22	Representación gráfica de la obtención de los parámetros en términos de la tensión vertical neta en los ciclos de carga – descarga y humedecimiento – secado. Desplazamiento de la superficie de fluencia (LC) en el espacio (u_a-u_w , σ_v-u_a), ensayo EDO-4.....	314
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.....	315
Figura 6.24	Variación de la succión matricial e índice de poros con respecto a la relación de agua de los ensayos edométricos (trayectoria tensional de A hasta E).....	316
Figura 6.25	Variación del índice de poros, relación de agua y grado de saturación con respecto a la tensión vertical neta de los ensayos edométricos (A → F).....	317
Figura 6.26	Valores de λ_{edo} y κ_{edo} a diferente succión matricial. Ensayos edométricos en trayectorias de carga y descarga.....	318
Figura 6.27	Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de tensiones (p, q, s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia para los ensayos edométricos en las trayectorias tensionales (B→C) y (C→D).....	318
Figura 6.28	Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\sigma_m-u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCD ensayo ISOW-1.....	319
Figura 6.29	Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\sigma_m-u_a) : e_w : e$. Trayectoria ABCD ensayo ISOW-2.....	320
Figura 6.30	Resultados isotrópicos representados en el plano $s : (\sigma_m-u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCD ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).....	321
Figura 6.31	Resultados isotrópicos representados en el plano $s : (\sigma_m-u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCDE ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotropa).....	322
Figura 6.32	Trayectoria de humedecimiento a tensión media neta constante (σ_m-u_a) = 0.3 MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-1 (Mini-célula isotropa).....	323
Figura 6.33	Trayectoria de humedecimiento a tensión media neta constante (σ_m-u_a) = 0.3 MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-2 (Mini-célula isotropa).....	342
Figura 6.34	Trayectoria de humedecimiento a tensión media neta constante (σ_m-u_a) = 0.2 MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).....	325
Figura 6.35	Trayectoria de humedecimiento a tensión media neta constante (σ_m-u_a) = 0.3 MPa. Trayectoria CD ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotropa).....	326
Figura 6.36	Intersección de la superficie de fluencia inicial de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-1 (Mini-célula isotropa)....	327
Figura 6.37	Intersección de la superficie de fluencia inicial de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-2 (Mini-célula isotropa)....	328
Figura 6.38	Intersección de la superficie de fluencia de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-3 (Mini-célula isotropa).....	329
Figura 6.39	Intersección de la superficie de fluencia de muestras sobreconsolidadas en una trayectoria de humedecimiento. Ensayo ISOW-4 (Mini-célula isotropa).....	330
Figura 6.40	Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el plano $s : (\sigma_m-u_a) : e_w : e$. Trayectoria BCDEFG ensayo ISO-1.....	331
Figura 6.41	Resultados isotrópicos obtenidos con la Mini-célula isotropa, representados en el	

	plano $s : (\sigma_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria ABCDEFG ensayo ISO-2.....	332
Figura 6.42	Trayectoria de humedecimiento y secado a tensión media neta constante ($\sigma_m - u_a$) = 0.6 MPa. Trayectoria BCDEFG ensayo ISO-1 (Mini-célula isótropa).....	333
Figura 6.43	Trayectoria de humedecimiento y secado a tensión media neta constante ($\sigma_m - u_a$) = 0.6 MPa. Trayectoria ABCDEFG ensayo ISO-2 (Mini-célula isótropa).....	334
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 isótropa).....	335
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 isótropa).....	336
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).....	337
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).....	338
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 ($u_a - u_w$, $\sigma_m - u_a$), ensayo ISO-1.....	339
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 ($u_a - u_w$, $\sigma_m - u_a$), ensayo ISO-2.....	340
Figura 6.48	Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de tensiones (p , q , s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia (LC) para los ensayos isótropos ISO-1 y ISO-2.....	341
Figura 6.49	Resultados isótropos ISO-1 y ISO-2, en el plano $\varepsilon_v : s : e_w : e : \sigma_m - u_a$	342
Figura 6.50	Resultados isótropos obtenidos con la Célula Triaxial, representados en el plano $s : (\sigma_m - u_a) : e_w : e$. Trayectorias de humedecimiento-secado, carga-descarga. Ensayo TISO-1.....	343
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 → ($u_a - u_w$) _f = 0.02 MPa. Ensayo TISO-1.....	344
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 ($\sigma_m - u_a$) = 0.6 MPa. Ensayo TISO-1.....	345
Fig. 6.53a	Variación de las 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).....	346
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).....	347
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 ($u_a - u_w$, $\sigma_m - u_a$), ensayo TISO-1.....	348
Figura 6.55	Vista tridimensional de la superficie de fluencia en el espacio de tensiones (p , q , s). Representación esquemática del movimiento de la superficie de fluencia (LC) para el ensayo isótropo TISO-1.....	349
Figura 6.56	Valores de λ , λ_{edo} , κ , y κ_{edo} a diferente succión matricial, de los ensayos isótropos y edométricos en trayectorias de carga y descarga.....	349
Figura 6.57	Perfiles de las deformaciones laterales en las etapas de humedecimiento y secado bajo tensión media constante ($\sigma_m - u_a$) = 0.06 MPa. Trayectoria BCDE,	

	TISO-1.....	350
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.....	350
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.....	351
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.....	351
Figura 6.61	Resultados isotrópicos obtenidos con la mini-célula y célula triaxial, representados en el plano $s : (\sigma_m-u_a) : e_w : e$. Ensayos ISO-1 y TISO-1.....	352
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 tensión media constante ($\sigma_m-u_a = 0.6$ MPa). Ensayos ISO-1 y TISO-1.....	353
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.....	354
Figura 6.64	Trayectoria de carga isotrópica (A→B) a succión constante. Ensayo de compresión triaxial IS – NC – 12.....	355
Figura 6.65	Ciclo de carga – descarga isotrópica (A→B→C) a succión constante. Ensayo de compresión triaxial IS – OC – 06.....	356
Figura 6.66	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-NC-06.....	357
Figura 6.67	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-NC-12.....	358
Figura 6.68	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-OC-03.....	359
Figura 6.69	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial. Ensayo IS-OC- 06.....	360
Figura 6.70	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica local y global de los ensayos del grupo IS, en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.....	361
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.....	362
Figura 6.72	Variación en la dirección del incremento de las deformaciones plásticas como una función de p para $\delta q / \delta p = 3$ y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IS – NC – 06.....	363
Figura 6.73	Superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de tensiones y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – NC – 06.....	364
Figura 6.74	Variación en la dirección del incremento de las deformaciones plásticas como una función de p para $\delta q / \delta p = 3$ y $s = 0.8$ MPa. Ensayo IS – NC – 12.....	365
Figura 6.75	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de tensiones y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – NC – 12.....	366
Figura 6.76	Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IS – OC – 06.....	367
Figura 6.77	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial a $s = 0.8$ MPa, trayectoria de tensiones y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IS – OC – 06.....	368

Figura 6.78	Deformación volumétrica en una trayectoria de secado a una succión total ($\Psi = 87$ MPa). Trayectoria de carga isotrópica (A→B) a succión matricial constante ($u_a - u_w = 0.8$ MPa). Ensayo de compresión triaxial IS – NC – 12.....	369
Figura 6.79	Resultados de compresión triaxial obtenidos con la célula triaxial representados en los planos $s : (\sigma_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria de carga isotrópica (A-B) y ciclo de humedecimiento – secado (B-C-D). Ensayo IWS – OC – 01.....	370
Figura 6.80	Resultados de compresión triaxial obtenidos con la célula triaxial representados en los planos $s : (\sigma_m - u_a) : e_w : e$. Trayectoria de carga isotrópica (A-B) y de humedecimiento (B-C). Ensayo IWS – NC – 02.....	371
Fig. 6.81a	Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 87.....	372
Fig. 6.81b	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial SI a $\Psi = 87$ MPa, trayectoria de tensiones y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 87.....	373
Figura 6.82	Determinación del punto de fluencia entre las deformaciones elásticas y plásticas en la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 01.....	374
Figura 6.83	Desplazamiento de la superficie de fluencia inicial, trayectoria de tensiones y vectores que nos indican la dirección de los incrementos de las deformaciones plásticas durante la etapa de corte. Ensayo IWS – OC – 01.....	375
Figura 6.84	Superficie de fluencia inicial ($s = 0.8$ MPa) y superficie de fluencia a $s = 0.02$ MPa, trayectoria de tensiones 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.....	376
Figura 6.85	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial (IWS – OC – 87).....	377
Figura 6.86	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial (IWS – OC – 01).....	378
Figura 6.87	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica y de corte, contenido de agua y grados de saturación con respecto a la deformación axial (IWS – NC – 02).....	379
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.....	380
Figura 6.89	Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica local y global de los ensayos del grupo IWS, en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.....	381
Figura 6.90	Línea de estado crítico en muestras no saturadas ($s = 0.8$ MPa) en el plano tensión desviadora – tensión media neta.....	382
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 tensión desviadora – tensión media neta.....	382
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.....	383
Figura 6.93	Resultado de los ensayos del grupo IS y IWS en la etapa de rotura. Variación de la tensión desviadora, deformación volumétrica local y global en muestras sobreconsolidadas y normalmente consolidadas.....	384
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.....	385

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).....	386
Figura 6.95	Influencia de la succión sobre el módulo de Young (E).....	386
Figura 6.96	Influencia del grado de saturación sobre el módulo de Young (E).....	387
Figura 6.97	Influencia de la tensión media neta sobre el módulo de Young (E).....	387
Figura 6.98	Forma de la superficie de fluencia inicial para una tensión 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 la tesis.....	388
Figura 6.99	Simulación del ciclo de carga–descarga del ensayo IS-OC-06 (trayectoria A→B→C). Parámetros de compresibilidad elástico y elastoplástico.....	389
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....	389
Fig. 6.101	Simulación del ciclo de secado–humedecimiento del ensayo IWS-OC-87. Parámetro de rigidez elastoplástico para cambios en succión.....	390
Fig. 6.102	Comparación entre resultados experimentales y calculados de la trayectoria de corte.....	391
Fig. 6.103	Simulación de las deformaciones volumétricas durante la etapa de corte.....	392
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.....	393