

Índice de Figuras

Figura 1.1	Triaxial de grandes dimensiones con diámetro de 0.91 m y altura de 2.28 m. Marachi <i>et al.</i> (1969).	3
Figura 1.2.	Resultados de ensayos triaxiales drenados con material seco y saturado de argilita triturada (Nobari y Duncan 1972). $\sigma_3 = 3.0$ kg/cm ² .	5
Figura 1.3	Ensayos edométricos de humedecimiento en caliza de la Angostura. Marsal (1972).	6
Figura 2.1	Variaciones granulométricas en pruebas triaxiales Lee y Farhoomand (1967).	15
Figura 2.2	Cambio granulométrico debido a la aplicación de diferentes amplitudes de cargas cíclicas senoidales en un ensayo edométrico de balasto (Chávez 1996).	16
Figura 2.3	Esquema de apoyo para definir el factor de rotura de Hardin (1985).	17
Figura 2.4	Pruebas de compresión y extensión confinada en arena de Cambria (Yamamuro y Lade 1996).	18
Figura 2.5	Rotura de partículas debida al humedecimiento del material, Nobari y Duncan (1972).	19
Figura 2.6	Variación del índice de rotura B_r en ensayos triaxiales, Lee y Coop (1995).	19
Figura 2.7	Curvas de propagación sub-crítica de las fisuras. Modelo conceptual de deformación volumétrica de escolleras (Oldecop y Alonso 2001).	21
Figura 2.8	Ensayos de compresión triaxial con σ_3 entre 2.1 y 11.5 MPa, Yamamuro y Lade (1996).	22
Figura 2.9.	Esquemas de apoyo para explicar las interacciones inter-granulares de las partículas. a) Fricción entre superficies planas, b) empuje entre partículas sueltas, c), d) y e) influencia de la forma de las partículas en la dilatancia Santamarina y Cho (2004), f) Influencia de la rotura de partículas sobre la dilatancia.	23

Figura 2.10. Ensayos triaxiales drenados en arena de Huston. Biarez y Hicher (1994).	25
Figura 2.11 Cambio de pendiente provocado por la rotura de partículas (Biarez y Hicher 1997).	26
Figura 2.12 Ensayos edométricos con humedad relativa controlada realizados por Oldecop (2000).	28
Figura 2.13 Ensayos triaxiales sobre arena granítica alterada Lee y Coop (1995).	30
Figura 2.14 Esquema del edómetro con humedad relativa controlada Oldecop y Alonso (2001).	32
Figura 2.15 Esquema general del comportamiento de escolleras Oldecop y Alonso (2001). a) Superficie de fluencia, b) Trayectorias seca y húmeda tensión deformación.	35
Figura 2.16 Deformación de colapso contra succión total, tensión vertical $\sigma = 0.6$ MPa.	36
Figura 2.17 Formas de superficie de fluencia más comunes encontradas en arenas Yasufuku <i>et al.</i> (1991).	38
Figura 2.18 Trayectorias para determinar la superficie de fluencia en arenas (Poooroshasb 1967).	39
Figura 2.19 Familia de superficies de fluencia en zona de rotura Miura <i>et al.</i> (1984).	39
Figura 2.20 Curvas experimentales obtenidas en bajas y altas tensiones para una trayectoria inicial, 0A, en compresión (Yasufuku <i>et al.</i> 1991).	41
Figura 2.21 Comparación del comportamiento observado y el modelado, para bajas tensiones. (Yasufuku <i>et al.</i> 1991).	42
Figura 2.22 Superficie de fluencia obtenida por Balasubramaniam <i>et al.</i> (1991).	43
Figura 2.23 a) Definición del ángulo de dilatación, b) Angulo de fricción movilizada.	45
Figura 2.24 Representación gráfica de la ecuación modificada de Rowe, Wan y Guo (1998).	47
Figura 2.25 Definición del parámetro de estado según Been y Jefferies (1985).	48
Figura 2.26 Efecto de la variación del parámetro b en la ecuación hiperbólica, Wood <i>et al.</i> (1994).	49
Figura 2.27 Efecto del valor inicial del parámetro de estado ψ_e , Wood <i>et al.</i> (1994).	50
Figura 3.1 Fotografía del equipo triaxial de escolleras. a) Célula triaxial, b) Grúa para la manipulación del equipo.	55
Figura 3.2 Esquema de la cámara triaxial desarrollada.	57
Figura 3.3 Sistema de soporte del DPT.	60

Figura 3.4 Esquema para la deducción de la relación entre el cambio de volumen de la probeta y el cambio de nivel detectado por el DPT.	61
Figura 3.5 Esquema general del equipo triaxial de escolleras.	64
Figura 3.6 Molde de compactación colocado sobre la base del triaxial.	65
Figura 3.7 a) Esquema en planta de la célula de medición diametral (CMD), b) foto de las galgas colocadas sobre el fleje.	68
Figura 3.8 Esquema para el análisis de las deformaciones del fleje. a) Esquema simplificado del fleje, b) Aplicación de carga unitaria horizontal, c) Aplicación de carga unitaria vertical, d) Desplazamientos finales del fleje, e) Distribución de tensiones en el apoyo A del fleje.	72
Figura 3.9 a) Esquema del dispositivo para colocar los LDT b) Fotos de soporte y disposición general de los LDT	75
Figura 3.10 Dispositivo de calibración de los LVDT.	79
Figura 3.11 Resultados de las calibraciones de los LVDT.	79
Figura 3.12 Equipo para la calibración de las células de medición diametral.	80
Figura 3.13 Resultados de las calibraciones de las CMD.	81
Figura 3.14 Resultados de calibraciones de los LDT.	81
Figura 3.15 Resultados de calibración de transductor de presión.	82
Figura 3.16 Resultados de la calibración del DPT.	83
Figura 3.17 Calibración de la célula de carga.	83
Figura 3.18 Respuesta ante la aplicación de la presión de confinamiento de los LVDT, célula de carga y CMD.	85
Figura 3.19 Variación de la lectura del DPT cuando se varía la presión de confinamiento aplicada.	86
Figura 3.20 Variación de la respuesta de los LDT con la presión de confinamiento.	86
Figura 3.21 Registro de la humedad relativa y de la temperatura durante un ensayo, donde se logró una humedad relativa del 92 ± 2 %.	91
Figura 4.1 Foto del afloramiento de pizarra en las márgenes del río Pancrudo.	94
Figura 4.2 Materiales ensayados. a) Material repuesto, b) Material inicial.	95
Figura 4.3 Granulometría del material antes y después de la compactación. Oldecop (2000)	96
Figura 4.4 Curva de retención de la pizarra del río Pancrudo. Datos experimentales y expresiones matemáticas ajustadas a las ramas de mojado y secado. Los números identifican las muestras ensayadas. Oldecop (2000).	97
Figura 4.5 Capa de material que evita la rotura prematura del material de la probeta Oldecop (2000)	98

Figura 4.6 Variación de la distribución granulométrica producida por la rotura de partículas del ensayo S1.	99
Figura 4.7 Trayectorias escalonadas para obtener segmentos de la superficie de fluencia.	102
Figura 4.8 Trayectorias básicas para encontrar la superficie de fluencia.	103
Figura 4.9 Trayectorias de tensión para encontrar la superficie de fluencia en la zona saturada, cuyo posicionamiento inicial fue hecho en la zona no saturada.	104
Figura 4.10 Ensayos de cambio de humedad relativa con carga vertical constante.	104
Figura 4.11 Comparación de ensayos con distinta presión de confinamiento, HR 100 %.	106
Figura 4.12 Mejora de los cálculos de deformación volumétrica después de la corrección. Ensayo D3(36)	108
Figura 4.13 Comparación de ensayos con distinta presión de confinamiento, HR 36 %.	109
Figura 4.14 Comportamiento desviador en deformaciones hasta 2% de los ensayos con HR 36%.	110
Figura 4.15 Comparación de los ensayos con diferentes humedades relativas, $\sigma_3=0.1$ y 0.3 MPa	111
Figura 4.16 Comparación de los ensayos con diferentes humedades relativas, $\sigma_3=0.5$ MPa	112
Figura 4.17 Comparación de los ensayos con diferentes humedades relativas, $\sigma_3=0.8$ MPa	113
Figura 4.18 Granulometrías después de la compactación, ensayos saturados y 36% de HR.	114
Figura 4.19 Evolución de los porcentajes retenidos en los tamices. Ensayos S y D(36).	115
Figura 4.20 Comparación de granulometrías obtenidas después del ensayo para una misma presión de confinamiento. a) $\sigma_3 = 0.1$ MPa, b) $\sigma_3 = 0.3$ MPa y c) $\sigma_3 = 0.5$ MPa	117
Figura 4.21 Rotura obtenida para los ensayos, saturados y con HR 36%.	118
Figura 4.22 Influencia de la HR en la rotura del material, para distintas presiones de confinamiento.	118
Figura 4.23 Trayectorias de $v-p$ y líneas de estado crítico para los ensayos con humedad relativa de 36% y 100%.	120
Figura 4.24 Trayectorias $v-p$ de los ensayos con una presión de confinamiento 0.5 MPa y diferentes humedades relativas.	121
Figura 4.25 Puntos p_{cr} , q_{cr} para los ensayos con humedad relativa de 36%, 92% y 100%.	122

Figura 4.26 Comparación de los ensayos con humedad relativa constante y uno donde varía la humedad relativa de 36 a 100%, con desviador constante. $\sigma_3 = 0.3$ MPa.	124
Figura 4.27 Resultados del ensayo DC5 en comparación con los hechos con la presión de confinamiento de 0.5 MPa.	126
Figura 4.28 Deformación axial en las diferentes etapas del ensayo.	127
Figura 4.29 Trayectorias escalonadas para la obtención de segmentos de la superficie de fluencia. Ensayo FSV1.	129
Figura 4.30 Ajuste de los segmentos de superficie de fluencia obtenidos de la Figura 4.29. Material saturado.	130
Figura 4.31 Trayectorias escalonadas para la obtención de segmentos de la superficie de fluencia. Ensayo FSV2.	130
Figura 4.32 Ajuste de los segmentos de superficie de fluencia obtenidos de la Figura 4.31. Material saturado.	131
Figura 4.33 Trayectorias $p-q$ y tensión-deformación para obtener la superficie de fluencia en material saturado. a) FS1, b) FS2 y c) FS3.	132
Figura 4.34 Trayectorias $p-q$ y tensión-deformación para obtener la superficie de fluencia en material con HR de 42%. a) FD1, b)FD2 y c)FD3.	133
Figura 4.35 Superficie de fluencia para el material saturado y con HR de 36%.	134
Figura 4.36 Obtención de puntos de fluencia de los ensayos a) FDS1, b) FDS2 y c) FDS3. La simbología de los puntos de fluencia corresponde con la Figura 4.37	135
Figura 4.37 Contracción de la superficie de fluencia cuando se pasa de una HR de 36 a 100 %.	136
Figura 4.38 Ensayos isótropos hechos en el equipo triaxial.	137
Figura 4.39 Curvas deformación-tiempo, para el ensayo isótropo saturado. Ensayo IS	138
Figura 4.40 Curvas de compresibilidad para el ensayo con trayectoria de colapso. Ensayo IC.	139
Figura 4.41 Comparación de las deformaciones axiales medidas con los LVDT y LDT. En ensayos D1(92), D3(92) y D5(92).	140
Figura 4.42 Comparación de las deformaciones axiales medidas con el LVDT y los LDT, deformación hasta 5%. En ensayos D1(92), D3(92) y D5(92).	141
Figura 4.43 Comparación entre deformaciones axiales medidas por LVDT, externos e internos a la célula triaxial. En ensayos D1(92), D3(92) y D5(92).	142
Figura 4.44 Esquema en planta de la probeta y la CMD. Visualización de la influencia de la penetración de membrana en la CMD.	144
Figura 4.45 Penetración de membrana obtenida del ensayo isótropo saturado.	144

Figura 4.46 Penetración de membrana durante los ensayos triaxiales con HR 92%.	145
Figura 4.47 Penetración de membrana en los ensayos triaxiales HR 100%.	146
Figura 4.48 Penetración de membrana en los ensayos triaxiales HR 36%.	146
Figura 5.1 Variación del parámetro b para los ensayos con control de deformación.	153
Figura 5.2 Variación de b en función de la succión total. El número sobre el punto indica la succión impuesta en MPa.	153
Figura 5.3 Variación de M_{cr} con la presión de confinamiento. Ensayos con deformación controlada.	154
Figura 5.4 Ganancia de resistencia en función de la succión respecto al material saturado. Ensayos con $\sigma_3 = 0.5$ MPa.	155
Figura 5.5 Rotura de partículas efectiva vs. trabajo plástico total.	157
Figura 5.6 Variación del parámetro b con el trabajo plástico.	158
Figura 5.7 Variación de M_{cr} con W_E^p .	159
Figura 5.8 Trayectoria $R-D$ para los ensayos de compresión triaxial saturados.	160
Figura 5.9 Trayectoria $R-D$ para los ensayos de compresión triaxial con HR de 36%.	161
Figura 5.10 Trayectoria $R-D$ para los ensayos de compresión triaxial con HR de 92%.	162
Figura 5.11 Trayectoria $R-D$ para los ensayos de compresión triaxial con $\sigma_3 = 0.5$ MPa.	162
Figura 5.12 Superficies de fluencia del modelo elasto-plástico de escolleras.	164
Figura 5.13 Trayectoria de para la obtención de la línea $p(\psi)$ o LC. Alonso <i>et. al.</i> (1990).	165
Figura 5.14 Dirección de los vectores de deformación plástica, ensayos S1, S3, S5 y S8.	166
Figura 5.15 Dirección de los vectores de deformación plástica, ensayos D1(36), D3(36), D5(36) y D8(36).	167
Figura 5.16 Variación de $y(\psi)$ con la succión en ensayos triaxiales de $\sigma_3 = 0.5$ MPa.	167
Figura 5.17 Ganancia de resistencia del material no saturado respecto al saturado.	169
Figura 5.18 Líneas de estado crítico utilizadas en la modelación.	174
Figura 5.19 Error que se produce en el cálculo del incremento de tensiones.	177
Figura 5.20 Comparación de los datos experimentales y la reproducción del modelo. Ensayos con $\sigma_3 = 0.1$ y 0.3 MPa.	179
Figura 5.21 Comparación de los datos experimentales y la reproducción del modelo. Ensayos con $\sigma_3 = 0.5$ y 0.8 MPa	180

- Figura 5.22 Comparación de los datos experimentales y la reproducción del modelo. Trayectoria de humedecimiento con desviador constante $\sigma_3 = 0.5$ MPa 181
- Figura 5.23. Envoltentes de resistencia obtenidas con los resultados de los ensayos y del modelo. La línea continua representa el modelo, y los símbolos los resultados del ensayo. 182

