

TABLA DE CONTENIDO

Lista de tablas	xiii
Lista de figuras	xv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	xv
1.1 Antecedentes y justificación de la investigación.....	xv
1.2 Objetivos y alcances del estudio.....	xviii
1.3 Organización de la tesis.....	xix
CAPÍTULO 2 CARACTERÍSTICAS DE LA ARCILLA USADA EN LA INVESTIGACIÓN.....	9
2.1. Introducción.....	9
2.2 Marco Geológico de la arcilla de Bogotá.....	9
2.3 Propiedades geotécnicas generales.....	10
2.4 Mineralogía.....	10
2.5 Microestructura.....	12
2.6 Curvas de retención	13
2.6.1 Equipos y métodos utilizados	13
2.6.1.1 <i>Psicrómetro de Transistores</i>	13
2.6.1.2 <i>Imposición de succión por equilibrio de vapor</i>	16
2.6.1.3 <i>Placa de Presión</i>	17
2.6.1.4 <i>Papel filtro</i>	18
2.6.1.5 <i>Contracción libre</i>	19
2.6.2 Resultados generales.....	19
2.7 Características de compresibilidad	21
2.7.1 Equipos y métodos utilizados	21
2.7.1.1 <i>Ensayo de consolidación unidimensional en condición saturada (EDO-SAT)</i> ..	21
2.7.1.2 <i>Ensayo edométrico de succión controlada por transferencia de vapor (EDO-TRV)</i>	22
2.7.1.3 <i>Ensayo edométrico de succión controlada por PEG (EDO-PEG)</i>	22
2.7.2 Resultados Generales.....	24
2.7.2.1 <i>Ensayo EDO-SAT</i>	24
2.7.2.2 <i>Ensayo EDO-TRV</i>	25
2.7.2.3 <i>Ensayo EDO-PEG</i>	26
2.8 Ensayos de resistencia sobre muestras reconstituidas	28
2.8.1 Ensayos de compresión simple	28
2.8.2 Ensayos triaxiales de compresión	28
2.8.3 Ensayos triaxiales de extensión	29
2.8.4 Ensayo de corte directo residual	29
2.9 Conclusiones.....	29

CAPÍTULO 3 ESTUDIOS DE AGRIETAMIENTO DE SUELOS: ESTADO DEL ARTE	69
3.1 Introducción	69
3.2 Estado del conocimiento sobre el agrietamiento de suelos	69
3.2.1 Estudios de morfología y evolución de grietas	70
3.2.2 Estudios de agrietamiento asociados a problemas locales específicos	71
3.2.3 Estudio de variables individuales que intervienen en el agrietamiento de suelos	71
3.2.4 Modelos de inicio, propagación y distribución espacial de grietas en suelos	72
3.2.5 Estudios del comportamiento de suelos agrietados	73
3.3 Revisión de algunos modelos físicos de agrietamiento y de flujo	73
3.3.1 Modelo de Lee et al (1988)	73
3.3.1.1 Comentarlos al modelo de Lee et al (1988)	74
3.3.2 Modelo de Morris et al (1992)	75
3.3.2.1 Comentarlos al modelo de Morris et al (1992)	76
3.3.3 Modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995)	77
3.3.3.1 Comentarlos al modelo de Abu-Hejleh y Znidarčić (1995)	79
3.3.4 Modelo de Konrad y Ayad (1997a)	79
3.3.4.1 Comentarlos al modelo de Konrad y Ayad (1997a)	81
3.3.5 Modelo de Bronswijk (1988)	81
3.3.5.1 Comentarlos al modelo de Bronswijk (1988)	82
3.4 Conclusiones	83
CAPÍTULO 4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	93
4.1 Introducción	93
4.2 Revisión de estudios de resistencia a la tracción en suelos	94
4.2.1 Evaluaciones indirectas basadas en criterios de resistencia al corte	94
4.2.2 Mediciones directas de resistencia a la tracción	97
4.3 Programa de ensayos de laboratorio	98
4.3.1 Ensayo de compresión unidimensional en cámara triaxial para reproducir trayectorias de tensiones previas a la rotura por tracción	98
4.3.2 Ensayos de tracción en carga controlada	100
4.3.3 Ensayos de tracción en deformación controlada	103
4.4 Análisis de resultados	103
4.4.1 Relaciones tensión-deformación –succión en ensayos de carga controlada	103
4.4.2 Relaciones tensión-deformación en ensayos de deformación controlada	105
4.4.3 Relaciones entre resistencia a la tracción y resistencia a la compresión	106
4.5 Modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas	107
4.6 Criterio de inicio de grietas basado en el modelo de resistencia a la tracción	111
4.7 Conclusiones	113
CAPÍTULO 5 MECÁNICA DE FRACTURA Y SU APLICACIÓN AL ESTUDIO DE AGRIETAMIENTO DE ARCILLAS	136
5.1 Introducción	136
5.2 Conceptos básicos de mecánica de fractura lineal elástica (LEFM)	137
5.2.1 Modos de fractura	137
5.2.2 Tensión de fractura de Griffith	137
5.2.3 Tasa de liberación de energía y energía de fractura	139
5.2.4 Factor de intensidad de tensiones	141

5.2.5 Zona plástica o zona de proceso de fractura (ZPF).....	144
5.2.6 Determinación experimental de los parámetros de LEFM	145
5.2.6.1 Determinación del factor de intensidad de tensiones crítico (K_{IC})	145
5.2.6.2 Determinación de la tasa crítica de liberación de energía (G_{IC}).....	146
5.2.6.3 Criterios de validez de los ensayos de LEFM	147
5.3 Ensayos realizados sobre la arcilla de Bogotá para obtener parámetros de LEFM.....	148
5.3.1 Preparación de muestras	148
5.3.2 Equipo y procedimiento de ensayos de MF en deformación controlada.....	149
5.3.3 Equipo y procedimiento de ensayos de MF carga controlada	149
5.3.4 Resultados de ensayos de deformación controlada.....	150
5.3.5 Resultados de ensayos de carga controlada	152
5.4 Efecto de tamaño en mecánica de fractura	154
5.4.1 Tensión nominal y representación del efecto de tamaño	154
5.4.2 Efecto de tamaño en términos de balance de energía	155
5.4.3 Otras causas del efecto de tamaño en la resistencia nominal.....	157
5.4.3.1 Efecto de capa de borde o efecto de pared.....	157
5.4.3.2 Fenómeno de difusión.....	158
5.4.3.3 Calor de hidratación	158
5.4.3.4 Efecto Estadístico	158
5.4.3.5 Naturaleza fractal de las superficies de agrietamiento.....	159
5.5 Ensayos para evaluar parámetros de fractura sobre la arcilla de Bogotá, a partir de la ley de efecto de tamaño	160
5.5.1 Resultados de los ensayos de efecto de tamaño.....	160
5.6 Comparación de resultados con otros estudios.....	162
5.7 Conclusiones.....	163

CAPÍTULO 6 ESTUDIO MICROSCÓPICO DEL AGRIETAMIENTO DE LA ARCILLA

.....	189
6.1 Introducción.....	189
6.2 Equipos empleados y condiciones de ensayo	190
6.3 Procedimiento de ensayo	191
6.4. Evolución morfológica general de las microgrietas en la arcilla (observaciones con ESEM y microscopio óptico)	192
6.5 Análisis morfológico de una zona microagrietada a diferentes escalas de magnificación (observaciones con SEM y detector BSE).....	195
6.6 Efecto de la geometría de la muestra en las condiciones de agrietamiento.....	195
6.7 Comportamiento del suelo agrietado ante la incorporación de agua.....	196
6.8 Composición química en la zona de agrietamiento	197
6.9. Interpretación del posible mecanismo de avance de microgrietas en la arcilla.....	199
6.10 Conclusiones.....	200

CAPÍTULO 7 MORFOLOGÍA DEL AGRIETAMIENTO DE LA ARCILLA EN MUESTRAS DE TAMAÑO INTERMEDIO

.....	219
7.1 Introducción.....	219
7.2 Procedimiento y equipos	220
7.3 Curvas de desecación y humedad de agrietamiento	221
7.4 Mecanismos y morfología de agrietamiento de muestras en moldes pequeños (MP) y micro (MM).....	225

7.5 Estimación de las tensiones impuestas por los moldes MP y MM.....	226
7.6 Agrietamiento de muestras en bandejas	228
7.7. Cuantificación de los agrietamientos en muestras de bandejas.....	229
7.8 Efecto de rehidratar las muestras agrietadas.....	230
7.9 Conclusiones.....	231
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTURAS	
INVESTIGACIONES	261
8.1 Conclusiones Específicas	261
8.1.1 Caracterización de la arcilla empleada	261
8.1.2 Estado del arte sobre estudios de agrietamiento de suelos	262
8.1.3 Resistencia a la tracción.....	263
8.1.4 Mecánica de fractura.....	264
8.1.5 Estudio microscópico del agrietamiento de la arcilla	265
8.1.6 Morfología del agrietamiento en muestras de tamaño intermedio.....	267
8.2 Conclusión General	268
8.3 Recomendaciones para futuras investigaciones	269
8.3.1 Caracterización de la arcilla.....	269
8.3.2 Resistencia a la tracción.....	270
8.3.3 Mecánica de fractura.....	270
8.3.4 Morfología y evolución de agrietamientos	271
8.3.5 modelación numérica	271
REFERENCIAS	273

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1 Parámetros básicos de la arcilla entre 2 y 4 m de profundidad	33
Tabla 2. 2 Composición mineralógica aproximada de la arcilla de Bogotá a partir de análisis de difracción de rayos X (deducido de Gaviria et al, 2004).	33
Tabla 2. 3 Resumen de técnicas y equipos para medición de succión (Gens y Romero, 2000).	34
Tabla 2. 4 Succiones impuestas por soluciones de NaCl a diferentes concentraciones.....	34
Tabla 2. 5 Succiones asociadas a diversas soluciones salinas saturadas (Vicol, 1990, en: Lloret, 1993).	35
Tabla 3. 1 Panorama general sobre estudios de agrietamiento de suelos y temas tratados en la presente investigación.	85
Tabla 4. 1 Datos resumen de los ensayos de tracción en carga controlada con medida de succión.	115
Tabla 4. 2 Datos resumen de los ensayos de tracción en deformación controlada.....	115
Tabla 5. 1 Datos y resultados de los ensayos de LEFM en deformación controlada sobre muestras de arcilla reconstituida ($W = 45$ mm).....	167
Tabla 5. 2 Datos y resultados de los ensayos de LEFM en carga controlada sobre muestras de arcilla reconstituida ($W = 45$ mm).....	167
Tabla 5. 3 Datos de los ensayos realizados para evaluar efecto de tamaño.	168
Tabla 5. 4 Resumen de resultados de G_{IC} obtenidos por el método de la complianza y por el método de efecto de tamaño.	168
Tabla 5. 5 Resumen de resultados de K_{IC} obtenidos por diferentes procedimientos.....	168
Tabla 5. 6 Comparación de parámetros de MF obtenidos en diferentes estudios y distintos tipos de material.	169
Tabla 6. 1 Carta isobárica de humedad relativa del ESEM.	203
Tabla 7. 1 Datos generales de los ensayos de retracción y agrietamiento en bandejas, moldes pequeños y moldes micro.	233
Tabla 7. 2 Datos para estimar las tensiones de tracción ejercidas por los moldes a la humedad de agrietamiento y comparación con la resistencia a la tracción a esa misma humedad.	234
Tabla 7. 3 Datos geométricos de la condición final de agrietamiento en ensayos de desecación en bandejas.	234

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Corte geológico generalizado de la Sabana de Bogotá, en sentido E-W. (Adaptado de Ingeominas y Universidad de Los Andes, 1997).....	37
Figura 2. 2 Distribución de tamaños de partículas.	37
Figura 2. 3 Relación entre índice de plasticidad y fracción arcillosa (Skempton, 1953, en: Lambe y Whitman, 1979).....	38
Figura 2. 4 Ley de Bragg (Mitchell, 1993).....	38
Figura 2. 5 Perfiles mineralógicos de la arcilla de Bogotá. Pozo Ingeominas entre 0 y 160 m. (Gaviria et al, 2004).....	39
Figura 2. 6 Tipos de fábrica (Gens y Alonso, 1992). (a) Matriz arcillosa, constituida predominantemente por arreglos elementales de grumos de arcilla (clay platelets). (b) Microfábrica de una arcilla, constituida predominantemente por agrupación de arreglos elementales de partículas. (c) Arreglo elemental de partículas en una configuración paralela.	40
Figura 2. 7 Fotografías de la microfábrica de la arcilla inalterada (muestra tomada a 2.2 m de profundidad).	41
Figura 2. 8 Fotografías de la microfábrica de la arcilla inalterada (muestra tomada a 4m de profundidad).	42
Figura 2. 9 Técnicas experimentales de aplicación de succión, rangos típicos de succión aplicada y tiempos de equilibrado aproximados para suelos arcillosos con distancia de drenaje de 10 mm (Gens y Romero, 2000).....	43
Figura 2. 10 Principio de funcionamiento del psicrómetro.	44
Figura 2. 11 Esquema del Psicrómetro de transistores de marca SMI.	44
Figura 2. 12 Succión total impuesta al suelo con diferentes concentraciones de cloruro de sodio (Romero, 1999).....	45
Figura 2. 13 Campana de desecación para aplicar succión por equilibrio de vapor (Esteban, 1990; en Lloret, 1993).	45
Figura 2. 14 Esquema del equipo de placa de presión (Lloret, 1993).	46
Figura 2. 15 Curvas de calibración del papel filtro Whatman No 42 (Marinho, 1994).	46
Figura 2. 16 Retracción de la muestra S1-M8 por reducción de humedad: a) variación del índice de poros b) variación del grado de saturación.	47
Figura 2. 17 Curva de de retención de la muestra S1-M8: a) en términos de la variación de humedad b) en términos de la variación del grado de saturación.....	48
Figura 2. 18 Retracción de la muestra S1-M10 por reducción de humedad para condiciones inalterada y alterada: a) variación del índice de poros b) variación del grado de saturación.....	49
Figura 2. 19 Curva de de retención de la muestra S1-M10 para condiciones inalterada y alterada: a) en términos de la variación de humedad b) en términos de la variación del grado de saturación.....	50
Figura 2. 20 Curva de retención S1-M8 en términos del contenido volumétrico de agua.	51
Figura 2. 21 Curva de retención S1-M10 en términos del contenido volumétrico de agua.	51
Figura 2. 22 Esquema del edómetro con succión controlada por transferencia de vapor.	52
Figura 2. 23 Esquema para mostrar el principio de ósmosis (Dineen, 1997).....	52
Figura 2. 24 Esquema del edómetro con succión controlada por PEG.	53

Figura 2. 25 Variación de la succión medida en el tiempo para diferentes concentraciones de PEG 35.000.....	53
Figura 2. 26 Curva de calibración de PEG 350.000 con tensiómetro IC y membrana Spectrum por 5.....	54
Figura 2. 27 Comparación de la calibración de PEG 35.000 con otras calibraciones (Gens y Romero, 2000).....	54
Figura 2. 28 Curva de compresibilidad obtenida de ensayo edométrico convencional EDO-SAT.....	55
Figura 2. 29 Deformación de la muestra en función de la raíz cuadrada del tiempo, para diferentes incrementos de carga, ensayo EDO-SAT.....	55
Figura 2. 30 Coeficiente de consolidación a diferentes valores de tensión vertical, ensayo EDO-SAT.....	56
Figura 2. 31 Variación del coeficiente de permeabilidad con el índice de poros, ensayo EDO-SAT.....	56
Figura 2. 32 Trayectoria de tensiones del ensayo EDO-TRV.....	57
Figura 2. 33 Deformación volumétrica producida por la aplicación de succión en ensayo EDO-TRV.....	57
Figura 2. 34 Variación de la deformación en función del tiempo para diferentes incrementos de succión en ensayo EDO-TRV.....	58
Figura 2. 35 Deformación volumétrica producida por aplicación de carga vertical después de un ciclo de succión máxima de 144.3 MPa, en ensayo EDO-TRV.....	58
Figura 2. 36 Superficies de fluencia en el espacio p, q, s, (Alonso et al, 1990).....	59
Figura 2. 37 Trayectoria de tensión-succión del ensayo EDO-PEG.....	59
Figura 2. 38 Comparación entre la succión impuesta con PEG 35.000 y la medida en el tensiómetro IC. Ensayo EDO-PEG.....	60
Figura 2. 39 Variación de la succión con el tiempo en trayectoria de secado, ensayo EDO-PEG.....	60
Figura 2. 40 Variación de la succión con el tiempo en trayectoria de mojado, ensayo EDO-PEG.....	61
Figura 2. 41 Variación de la deformación en el tiempo para diferentes concentraciones de PEG. Ensayo EDO-PEG.....	61
Figura 2. 42 Deformación al final de cada incremento de succión osmótica en ensayo EDO-PEG.....	62
Figura 2. 43 Deformación producida por la aplicación de tensión vertical en ensayo EDO-PEG.....	62
Figura 2. 44 Esquema de la deformación inducida por la membrana en la parte inferior de la muestra en ensayo EDO-PEG.....	63
Figura 2. 45 Presión de preconsolidación para diferentes valores máximos de succión en ensayos EDO-SAT, EDO-TRV Y EDO-PEG.....	63
Figura 2. 46 Variación del grado de saturación en el tiempo, ensayo EDO-PEG.....	64
Figura 2. 47 Curvas tensión-deformación de ensayos de compresión simple en muestras reconstituidas, compactadas a diferente humedad.....	64
Figura 2. 48 Variación de la resistencia a la compresión simple y del módulo de elasticidad en función de la humedad y la succión.....	65
Figura 2. 49 Curvas tensión-deformación de ensayos triaxiales de compresión.....	65
Figura 2. 50 Trayectorias de tensiones efectivas de ensayos triaxiales de compresión.....	66
Figura 2. 51 Curvas tensión-deformación de ensayos triaxiales de extensión.....	66
Figura 2. 52 Trayectorias de tensiones efectivas de ensayos triaxiales de extensión.....	67

Figura 2. 53 Resultados de ensayo de corte directo residual sobre material remoldeado y previamente cortado por la superficie de rotura.	67
Figura 3. 1 Mecanismo de propagación de grieta propuesto en el modelo de Lee et al (1988). a) antes de la propagación de la grieta, b) después de la propagación de la grieta.	87
Figura 3. 2 Representación esquemática de las envolventes de rotura en tracción y en corte y su relación con la succión en el modelo de Morris et al (1992).	87
Figura 3. 3 Esquema de la condición de rotura por agrietamiento basado en la solución de Rankine (Morris et al, 1992).	88
Figura 3. 4 Trayectorias de tensiones totales y efectivas durante el proceso general de consolidación y desecación (Abu-Hejleh y Znidarčić, 1995).	88
Figura 3. 5 Diagrama de flujo del modelo propuesto por Konrad y Ayad (1997a).	89
Figura 3. 6 Factores de intensidad de tensiones para distribuciones de tensión uniforme y de aumento lineal (tomado de Konrad y Ayad, 1997a).	89
Figura 3. 7 a) distribución de tensiones al inicio del agrietamiento, b) distribución trapezoidal de tensiones propuesta en el modelo de Konrad y Ayad (1997a).	90
Figura 3. 8 Modelo de Konrad y Ayad (1997a) para determinar la distancia promedio (D) entre grietas.	90
Figura 3. 9 Esquema del modelo de flujo propuesto por Bronswijk (1988). Parte izquierda modelo original para cálculo de balance de agua y parte derecha modelo modificado para incluir efecto de las grietas y subsidencia.	91
Figura 4. 1 Representación de la resistencia a la tracción en función de la cohesión y el ángulo de resistencia al corte de Mohr-Coulomb.	117
Figura 4. 2 Resistencia a la tracción a partir de envolventes de resistencia en compresión (de Lee & Ingles: en Morris et al, 1992).	117
Figura 4. 3 a) modelo capilar sin oquedades ni grietas, b) con oquedades (de Snyder & Miller, 1985).	118
Figura 4. 4 Equipo de medición de resistencia a la tracción usado por Towner (1987b).	118
Figura 4. 5 Equipo de medición de resistencia a la tracción usado por Tang y Graham (2000).	118
Figura 4. 6 Trayectoria seguida en ensayo de compresión Ko en equipo triaxial sobre la arcilla de Bogotá.	120
Figura 4. 7 Variación de la lectura de desplazamiento radial durante el ensayo de compresión Ko en equipo triaxial.	120
Figura 4. 8 Equipo para ensayo de tracción directa en carga controlada, con medida de deformación y succión. a) esquema general del montaje, b) detalle del molde y la instrumentación.	121
Figura 4. 9 Esquema del tensiómetro del Imperial College (Ridley y Burland, 1996).	122
Figura 4. 10 Calibración del tensiómetro del IC en el rango de 0 a 200 kPa.	122
Figura 4. 11 Equipo para ensayo de tracción a deformación controlada con medida de carga y deformación adaptado en una máquina de corte directo: a) vista lateral del equipo, b) vista superior del equipo, c) detalle de la muestra en la rotura.	123
Figura 4. 12 Curvas de deformación – tensión de tracción para diferentes condiciones iniciales de succión (ensayo de tracción en carga controlada).	124

Figura 4. 13 Curvas de succión – tensión de tracción (ensayo de tracción en carga controlada).	124
Figura 4. 14 Resistencia a la tracción en función de la succión final en ensayos de tracción en carga controlada.	125
Figura 4. 15 Comparación de datos de resistencia a la tracción en función de la succión (S) y del grado de saturación (Sr) e intervalos teóricos de variación según el modelo de Snyder y Miller (Snyder y Miller, 1985).	125
Figura 4. 16 Curvas de deformación - succión (ensayo de tracción en carga controlada).	126
Figura 4. 17 Incremento irregular de la succión respecto a la succión inicial (ensayos de tracción en carga controlada).	126
Figura 4. 18 Esquema de una probable distribución de los incrementos de succión respecto al plano de rotura por tracción.	127
Figura 4. 19 Curvas de tensión – deformación de los ensayos (a) hasta (f) en tracción a deformación controlada.	127
Figura 4. 20 Curvas de tensión – deformación de los ensayos (g) hasta (k) en tracción a deformación controlada.	128
Figura 4. 21 Módulo de elasticidad en tracción en función de la humedad.	128
Figura 4. 22 Comparación de resultados de resistencia a la tracción en función de la humedad, obtenidos en ensayos de carga controlada y de deformación controlada.	129
Figura 4. 23 a) Comparación entre resultados de resistencia a la compresión simple y resistencia a la tracción para diferentes humedades b) variación de la relación σ_t / σ_c en función de la humedad.	129
Figura 4. 24 Representación en círculos de Mohr de las condiciones de tensión en el ensayo de tracción.	130
Figura 4. 25 Esquema de las trayectorias totales y efectivas en un ensayo de tracción directa con medición de succión.	130
Figura 4. 26 Comparación entre trayectorias de tensiones obtenidas en ensayos de tracción directa y de compresión y extensión en equipo triaxial.	131
Figura 4. 27 Esquema de las etapas que se presentan durante la rotura por tracción.	132
Figura 4. 28 Comparación entre la resistencia a la tracción medida y la estimada, para $\alpha'_t = 9^\circ$.	132
Figura 4. 29 Comparación entre la resistencia a la tracción medida y la estimada, para $\alpha'_t = 6^\circ$.	133
Figura 4. 30 Comparación entre la succión final medida y la estimada.	133
Figura 4. 31 Criterio de inicio de grietas por desecación, utilizando el modelo de resistencia a la tracción en tensiones efectivas: a) tensión vertical nula, b) tensión vertical constante y mayor que cero.	134
Figura 5. 1 Modos de Fractura: a) modo I o modo de apertura b) modo II o modo deslizante c) modo III o modo de rotura transversal	171
Figura 5. 2 a) Placa semiinfinita con cavidad central de longitud $2a$ (doble punta de grieta), sometida a tensión, b) media placa con grieta sencilla de longitud a , sometida a tensión.	171
Figura 5. 3 a) Placa con extremos fijos, sometida a tracción, b) reducción de energía por extensión de grieta.	172
Figura 5. 4 a) Placa con extremos libres sometida a tensión uniforme, b) Placa con extremos libres sometida a carga, c) Reducción de energía por extensión de grieta.	172

Figura 5. 5 Campo de tensiones próximo a la punta de una grieta.....	173
Figura 5. 6 Zona plástica en la punta de una grieta: a) tensión teórica en un medio elástico, b) zona plástica teórica próxima a la punta de la grieta, c) zona plástica con corrección de Irwin.	173
Figura 5. 7 Especímenes usados para pruebas de LEFM en suelos.	174
Figura 5. 8 Curvas típicas de carga-desplazamiento: a) comportamiento lineal con rotura frágil, b) fenómeno de <i>pop-in</i> , c) comportamiento elastoplástico y criterio de linealidad.	174
Figura 5. 9 Dimensiones de la muestra CT empleada en ensayos de mecánica de fractura..	175
Figura 5. 10 Molde empleado para la fabricación de muestras para ensayos de mecánica de fractura.....	175
Figura 5. 11 Preparación de la muestra y detalle de una muestra recién extraída del molde.	176
Figura 5. 12 Esquema del montaje de los ensayos de MF en deformación controlada.....	176
Figura 5. 13 Esquema del montaje de los ensayos de MF en carga controlada	177
Figura 5. 14 Curvas de carga-desplazamiento para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en deformación controlada.	177
Figura 5. 15 Comparación entre P_{max} y P_Q en ensayos de MF en deformación controlada ...	178
Figura 5. 16 Variación de la complianza para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en deformación controlada.....	178
Figura 5. 17 Variación de la tasa crítica de liberación de energía para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en deformación controlada.	179
Figura 5. 18 Comparación entre los valores de complianza medidos y los obtenidos por el método inverso, a partir de un valor medio de $G_{IC} = 7.0$ N/m. (Ensayos de MF en deformación controlada).....	179
Figura 5. 19 Variación del factor de intensidad de tensiones crítico para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en deformación controlada.	179
Figura 5. 20 Curvas de carga-desplazamiento para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en carga controlada.....	180
Figura 5. 21 Variación de la complianza para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en carga controlada.	181
Figura 5. 22 Variación de la tasa crítica de energía de deformación para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en carga controlada.....	181
Figura 5. 23 Variación del factor de intensidad de tensiones crítico para diferentes tamaños iniciales de grieta en ensayos de MF en carga controlada.....	182
Figura 5. 24 (a) Diagrama bilogárptico donde representa el efecto de tamaño en la resistencia, (b) efecto de tamaño en la ductilidad (Bazant y Planas, 1997)	182
Figura 5. 25 Explicación del efecto de tamaño (a) banda de agrietamiento, (b) grieta longitudinal simple (adaptado de Bazant y Planas 1997).....	183
Figura 5. 26 Interpretación esquemática del efecto de capa de borde asociado a concentración de partículas finas en los bordes de la estructura.....	183
Figura 5. 27 Interpretación esquemática del efecto de capa de borde asociado con la generación de tensiones transversales en el interior de una estructura.....	184
Figura 5. 28 Moldes empleados para la fabricación de las muestras geoméricamente similares pero de diferentes tamaños.	184
Figura 5. 29 Muestras empleadas para evaluar efecto de tamaño.	185
Figura 5. 30 Curvas de carga-desplazamiento (a) muestras pequeñas, (b) muestras medianas, (c) muestras grandes.	186
Figura 5. 31 Curvas de tensión nominal – desplazamiento relativo (a) muestras pequeñas, (b) muestras medianas, (c) muestras grandes.....	187

Figura 5. 32 Resultados de los ensayos representados en el gráfico bilogarítmico, donde se muestra el efecto de tamaño.	188
Figura 5. 33 Interpolación lineal para obtener parámetros de la ecuación de efecto de tamaño de Bazant.	188
Figura 6. 1 Molde para montar la muestra en el microscopio.	205
Figura 6. 2 Microscopio electrónico. Izquierda: cámara, microsonda de energía dispersiva de rayos X (EDX) y monitor. Derecha: detalle de la muestra dentro de la cámara del microscopio electrónico.	205
Figura 6. 3 Humedad relativa aparente (h_{ra}) definida por la presión en la cámara y la temperatura en el ESEM.	206
Figura 6. 4 Equipo de metalización de muestras para su observación en el microscopio electrónico con alto vacío y detector de electrones retrodispersados.	206
Figura 6. 5 Microscopio óptico binocular, dotado de cámara fotográfica en la parte superior. Aumentos entre 6.4X y 48X.	207
Figura 6. 6 Evolución típica de microagrietamientos por desecación de la arcilla.	208
Figura 6. 7 Rugosidad superficial al inicio del ensayo debida a la formación de pequeños grumos.	209
Figura 6. 8 Microgrietas discontinuas observadas al inicio de la desecación. (A) Punta de dos microgrietas que se traslapan, (B) partícula bordeada por puntas de microgrietas y (C) separación entre la muestra y una pared del molde.	209
Figura 6. 9 Coalescencia de tramos de microgrieta para formar una microgrieta continua (compárese con la Fig.6.8).	210
Figura 6. 10 Avance estable de microgrietas y aparición de microgrietas secundarias. (A) Avance de microgrieta principal, (B) aparición de microgrieta secundaria y (C) filamentos de suelo que quedan entre las caras de las microgrietas.	210
Figura 6. 11 Abertura de grieta principal en zona de mayor tracción al final de proceso de desecación (imagen digitalizada).	211
Figura 6. 12 Detalle de una grieta a diferentes niveles de amplificación. Imágenes tomadas con SEM, detector BSE y alto vacío.	212
Figura 6. 13 Agrietamientos finales para diferentes condiciones de restricción a la contracción: a) restricción uniaxial, b) restricción biaxial, c) restricción total en una dirección y parcial en la otra.	213
Figura 6. 14 Agrietamiento muy rápido por efecto de agregar agua a la muestra. (Imagen digitalizada, observada en el microscopio óptico).	213
Figura 6. 15 Trayectoria de tensiones ante el ingreso de agua en un punto P de la figura anterior.	214
Figura 6. 16 Espectro de energía dispersiva de Rayos- X y microanálisis químico.	214
Figura 6. 17 Proporción de la Composición química de la arcilla a diferentes humedades.	215
Figura 6. 18 a) Distribución de tensiones en la punta de una grieta, b) Forma de la zona plástica. (Adaptado de Broek, 1987).	215
Figura 6. 19 Representación esquemática del posible mecanismo de avance de microgrietas en la arcilla bajo una condición de deformación plana.	216
Figura 6. 20 Mecanismo de rotura por deformación en metales puros (Tomado de Broek, 1986).	216
Figura 6. 21 Posibles fuentes físicas de los agrietamientos cohesivos: a) enlaces atómicos, b) franja de dislocación, c) enlace de granos, d) enlace de fibras, e) agregados entrabados por fricción y f) traslapeo de grietas (Planas et al, 1995).	217

Figura 7. 1 Moldes usados para ensayos de retracción y agrietamiento.....	235
Figura 7. 2 Montaje general de los ensayos de retracción y agrietamiento a escala intermedia.	235
Figura 7. 3 Dimensiones de los moldes de ensayos de retracción y agrietamiento.....	236
Figura 7. 4 Variación de la humedad (w), la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (\downarrow) en ensayos de retracción en bandejas (Serie B1).....	237
Figura 7. 5 Variación de la humedad (w), la temperatura (T) y la humedad relativa (HR) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (\downarrow) en ensayos de retracción en bandejas (Serie B2).....	238
Figura 7. 6 Variación de la humedad (w) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (\downarrow) en ensayos de retracción en moldes pequeños (MP).....	239
Figura 7. 7 Variación de la humedad (w) en función del tiempo (t) y punto de inicio de grietas (\downarrow) en ensayos de retracción en moldes micro (MM).	240
Figura 7. 8 Esquema donde se compara una curva típica de desecación (a) con una curva de retracción (b).	241
Figura 7. 9 Relaciones entre la humedad inicial, la tasa de desecación inicial y el tipo de molde.	241
Figura 7. 10 Humedad de agrietamiento normalizada en función de la tasa de desecación inicial para los diferentes tipos de moldes.....	242
Figura 7. 11 Pérdida específica de agua en función del tiempo, para muestras de bandejas.	242
Figura 7. 12 Pérdida específica acumulada de agua en función del tiempo de desecación para ensayos MP, serie A.	243
Figura 7. 13 Pérdida específica acumulada de agua en función del tiempo, para ensayos MM de la serie A.	243
Figura 7. 14 Curvas conjuntas de pérdida específica acumulada de agua en función del tiempo, para ensayos de bandejas, MP y MM.....	244
Figura 7. 15 Relación entre la humedad de agrietamiento y la humedad inicial en bandejas, moldes pequeños y moldes micro.....	245
Figura 7. 16 Relación entre la humedad de agrietamiento normalizada y la humedad inicial en bandejas, moldes pequeños y moldes micro.....	246
Figura 7. 17 Datos conjuntos de humedad de agrietamiento en función de la humedad inicial.	247
Figura 7. 18 Relación entre la succión al inicio del agrietamiento y la humedad inicial: a) bandejas y moldes pequeños, b) moldes micro.	248
Figura 7. 19 Esquema de la contracción libre de una muestra cilíndrica de arcilla.	249
Figura 7. 20 a) Esquema de la posible distribución de fuerzas en los moldes MP y MM, b) evolución típica de los agrietamientos a medida que aumenta la desecación.	249
Figura 7. 21 Fotografías de una secuencia típica de agrietamiento en moldes pequeños (serie B).	250
Figura 7. 22 Fotografías del agrietamiento final en moldes pequeños, donde se presentan grietas primarias y secundarias (Serie C).	251
Figura 7. 23 Fotografía del agrietamiento final en moldes micro (Serie C).....	251
Figura 7. 24 Curvas de contracción axial-humedad en ensayos MPL (las muestras MPL3 y MPL4 se agrietaron).	252
Figura 7. 25 Esquema de trayectorias de tensiones efectivas en ensayos de retracción sin moldes (MPL1 a MPL4).....	252
Figura 7. 26 Curvas de contracción axial-humedad en ensayos MML.	253

Figura 7. 27 Comparación entre tensión de tracción estimada y resistencia a la tracción, en ensayos MPL y MML.....	253
Figura 7. 28 Agrietamiento primario típico y dirección inferida de las tensiones preferenciales a) muestras de la bandeja B1, b) muestras de la bandeja B2.....	254
Figura 7. 29 Fotografías de la secuencia de agrietamiento en el ensayo B1C.	255
Figura 7. 30 Fotografías e imágenes digitalizadas de la condición final en ensayos de la serie B1.	256
Figura 7. 31 Fotografías e imágenes digitalizadas de la condición final en ensayos de la serie B2.	257
Figura 7. 32 Relación entre el CIF y el porcentaje de contracción lateral en muestras de bandejas.	258
Figura 7. 33 Relación entre área media de celdas y longitud específica de grietas (Adaptado de Kodikara et al. (2000)).	258
Figura 7. 34 Agrietamientos inducidos por rehidratación de muestras previamente agrietadas y secas (ensayos B1-C y B2-C).	259
Figura 7. 35 Agrietamientos producidos por rehidratación de la muestra B2-C en dos etapas.	260