

# ÍNDICE

<b>Lista de figuras.....</b>	<b>xix</b>
<b><i>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</i></b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos y metodología de la investigación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Desarrollo de la Tesis.....</b>	<b>4</b>
<b><i>CAPÍTULO 2 COMPORTAMIENTO DE SUELOS NO SATURADOS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....</i></b>	<b>9</b>
<b>2.1 Introducción.....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Reseña histórica de la mecánica de los suelos no saturados.....	10
<b>2.2 El suelo no saturado. Generalidades.....</b>	<b>10</b>
2.2.1 Origen.....	10
2.2.2 Fases componentes de un suelo no saturado.....	12
2.2.3 Clasificación de los suelos no saturados.....	14
2.2.4 Estructura de los suelos.....	15
2.2.5 Succión en suelos no saturados.....	17
2.2.6 Comportamiento deformacional de los suelos no saturados.....	18
2.2.6.1 Fenómeno de colapso.....	18
2.2.6.2 Mecanismo de colapso.....	19
2.2.6.3 Fenómeno de hinchamiento.....	20
2.2.6.4 Factores que afectan al hinchamiento.....	22
2.2.6.5 Comportamiento volumétrico.....	23
2.2.6.6 Rigidez al corte de los suelos no saturados.....	25
2.2.6.7 Suelos compactados.....	27

<b>2.3</b>	<b>Técnicas experimentales</b> .....	30
2.3.1	Técnicas experimentales de aplicación y medida de la succión.....	30
2.3.2	Técnica de traslación de ejes.....	36
2.3.3	Células edométricas con control de succión.....	38
2.3.4	Célula triaxial con control de succión.....	40
2.3.4.1	Medidas de volumen en ensayos triaxiales no saturados.....	42
<b>2.4</b>	<b>Estado de tensiones</b> .....	43
2.4.1	Estado de tensiones para suelos saturados.....	44
2.4.2	Estado de tensiones para suelos no saturados.....	45
2.4.3	Parámetros de estado.....	48
2.4.4	Funciones y superficies de estado.....	48
<b>2.5</b>	<b>Modelo elastoplástico de Barcelona</b> .....	51
2.5.1	Generalidades de los modelos elastoplásticos.....	51
2.5.2	Modelo elastoplástico de Barcelona (BBM).....	55
 <b>CAPÍTULO 3 EQUIPO EXPERIMENTAL</b> .....		79
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b> .....	79
<b>3.2</b>	<b>Sistema de presión de aire y presión de agua</b> .....	80
<b>3.3</b>	<b>Psicrómetro de transistor</b> .....	81
<b>3.4</b>	<b>Célula triaxial automática (GDS instrument Ltd.)</b> .....	84
<b>3.5</b>	<b>Desarrollo de una célula edométrica con control de succión</b> .....	84
3.5.1	Edómetro convencional.....	84
3.5.2	Desarrollo de la nueva célula edométrica con control de succión.....	85
3.5.2.1	Descripción del nuevo edómetro con control de succión.....	85
3.5.2.1.1	Descripción de la célula edométrica.....	85
3.5.2.1.2	Equipos complementarios.....	87
3.5.3	Calibración mecánica: deformación de la célula edométrica.....	88
3.5.4	Efecto de envejecimiento sobre la permeabilidad al agua en los discos cerámicos AVEA.....	89
3.5.5	Determinación de la permeabilidad no saturada.....	91

<b>3.6</b>	<b>Mini-célula isotrópica rígida con control de la succión</b> .....	94
3.6.1	Diagrama general. Modificaciones para ensayos isotrópicos.....	94
3.6.2	Variación de tensiones y control de las trayectorias tensionales.....	95
<b>3.7</b>	<b>Célula triaxial con control de la succión</b> .....	95
3.7.1	Descripción del equipo.....	95
3.7.2	Medida de parámetros.....	97
3.7.2.1	Desplazamiento axial. Transductores LVDTs.....	98
3.7.2.2	Desplazamiento radial. Sensores láser electro – óptico.....	99
3.7.2.3	Tensión vertical. Célula de carga.....	102
3.7.3	Sistema de adquisición de datos.....	104
<b>CAPÍTULO 4 SUELO USADO DURANTE LA INVESTIGACIÓN</b> .....		133
<b>4.1</b>	<b>Origen geológico y composición del suelo</b> .....	133
4.1.1	Origen del suelo.....	133
4.1.2	Difracción de rayos X.....	134
4.1.3	Microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM).....	134
4.1.4	Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP).....	136
<b>4.2</b>	<b>Ensayos de clasificación geotécnica</b> .....	139
4.2.1	Granulometría.....	139
4.2.2	Límites de consistencia.....	140
4.2.3	Obtención de curvas humedad – densidad bajo diferentes valores de energía específica de compactación.....	141
<b>4.3</b>	<b>Ensayos de compactación isotrópica y técnicas de preparación de las diferentes estructuras de suelo usados en los ensayos</b> .....	143
4.3.1	Ensayos de compactación estática bajo tensión isotrópica controlada.....	143
4.3.1.1	Procedimiento de ensayo y resultados.....	143
4.3.2	Técnica de preparación de las muestras usadas en los diferentes ensayos.....	146
4.3.3	Análisis de las curvas succión–grado de saturación y succión–humedad de compactación. Curva de retención.....	148
4.3.3.1	Introducción.....	148
4.3.3.2	Curva de retención.....	149

<b>4.4</b>	<b>Ensayos previos de comportamiento deformacional.....</b>	150
4.4.1	Ensayos de colapso.....	150
4.4.1.1	Ensayos de colapso. Edómetro convencional.....	150
4.4.1.2	Ensayos de colapso. Célula edométrica con control de succión.....	152
4.4.2	Ensayos de compresión isotropa en suelos saturados.....	156
<b>4.5</b>	<b>Ensayos previos de comportamiento de rotura en suelos saturados.....</b>	159
4.5.1	Trayectorias tensionales y programa de ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	159
4.5.2	Ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	162
 <b>CAPÍTULO 5   PROGRAMA EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTOS.....</b>		 201
<b>5.1</b>	<b>Introducción.....</b>	201
<b>5.2</b>	<b>Programa y trayectorias de los ensayos edométricos con control de succión.....</b>	202
<b>5.3</b>	<b>Programa y trayectorias de los ensayos isotropos realizados en la mini – célula isotropa rígida.....</b>	207
<b>5.4</b>	<b>Programa y trayectoria del ensayo isotropo realizado en la célula triaxial con control de succión.....</b>	211
<b>5.5</b>	<b>Programa de ensayos y trayectorias tensionales de los ensayos triaxiales en muestras no saturadas.....</b>	215
5.5.1	Programa y trayectorias tensionales de los ensayos triaxiales realizados en la célula triaxial con control de succión.....	215
 <b>CAPÍTULO 6   RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>		 237
<b>6.1</b>	<b>Resultados edométricos con control de succión.....</b>	237
6.1.1	Introducción.....	237
6.1.2	Aspectos generales de las variables de estado tensional.....	327
6.1.3	Resultados de los ensayos.....	238
6.1.3.1	Ensayo EDO – 1.....	238
6.1.3.2	Ensayo EDO – 2.....	243
6.1.3.3	Ensayo EDO – 3.....	245
6.1.3.4	Ensayo EDO – 4.....	247
6.1.4	Comentarios finales.....	248

<b>6.2</b>	<b>Resultados isótropos con control de succión</b> .....	253
6.2.1	Ensayos isótropos: Mini – célula isótropa rígida.....	253
6.2.1.1	Ensayos de humedecimiento bajo carga constante.....	253
6.2.1.2	Ensayos de humedecimiento - secado y carga - descarga.....	256
6.2.1.3	Comentarios finales.....	259
6.2.2	Ensayos isótropos: Célula triaxial con control de succión.....	261
6.2.2.1	Trayectorias múltiples de humedecimiento – secado y carga – descarga.....	261
6.2.2.2	Comentarios finales.....	267
6.2.3	Comparación de resultados de la Mini-célula isótropa y Célula Triaxial.....	268
<b>6.3</b>	<b>Resultados triaxiales con control de succión</b> .....	270
6.3.1	Introducción.....	270
6.3.2	Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IS.....	270
6.3.2.1	Etapa de compresión isótropa.....	271
6.3.2.2	Etapa de rotura.....	272
6.3.3	Ensayos triaxiales con control de succión del grupo IWS.....	276
6.3.3.1	Etapa de compresión isótropa.....	277
6.3.3.2	Etapa de cambio de succión .....	277
6.3.3.3	Etapa de rotura.....	280
6.3.4	Líneas de estado crítico.....	282
6.3.5	Comentarios finales.....	284
<b>6.4</b>	<b>Interpretación de los ensayos de compresión triaxial mediante el modelo elastoplástico BBM</b> .....	286
6.4.1	Introducción.....	286
6.4.2	Reproducción de los resultados experimentales.....	289
6.4.3	Comentarios finales.....	291
 <b>CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....		395
<b>7.1</b>	<b>Resumen y conclusiones</b> .....	395
7.1.1	Características del material ensayado.....	395

7.1.2	Equipo de laboratorio desarrollado.....	398
7.1.3	Resultados de los ensayos mecánicos con succión controlada.....	399
<b>7.2</b>	<b>Líneas futuras de investigación.....</b>	<b>403</b>
 <b>REFERENCIAS.....</b>		 <b>405</b>
<i>Anexo A</i>	<i>Procedimiento de ensayos edométricos con control de succión.....</i>	<i>415</i>
<i>Anexo B</i>	<i>Procedimiento de ensayos isótropos con control de succión. Mini – célula isótropa rígida.....</i>	<i>423</i>
<i>Anexo C</i>	<i>Procedimiento de ensayos isótropos y triaxiales en muestras no saturadas.....</i>	<i>435</i>
<i>Anexo D</i>	<i>Resultados experimentales.....</i>	<i>449</i>
	D.1 Ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	449
	D.2 Ensayos triaxiales en muestras no saturadas.....	450