

ÍNDICE

Índice de Tablas.....	viii
Índice de Figuras.....	x
Introducción y objetivos.....	1
I.1 Marco del trabajo y antecedentes.....	1
I.2 El proyecto EB.....	5
I.3 Objetivos de la Tesis Doctoral.....	6
I.4 Estructura de la Tesis.....	8
Capítulo 1: Características fundamentales del material utilizado.....	14
1.1 La bentonita.....	14
1.1.1 Composición y estructura de la bentonita.....	14
1.1.2 Propiedades fisicoquímicas.....	15
1.1.2.1 Superficie específica.....	15
1.1.2.2 Capacidad de intercambio cationico.....	15
1.1.2.3 Hidratación e hinchamiento.....	16
1.1.2.4 Plasticidad.....	16
1.1.3 Usos de la bentonita.....	17
1.2 Pellets de bentonita.....	17
1.2.1 Proceso de fabricación de los pellets de bentonita.....	17
1.2.2 Caracterización de la estructura interna de los pellets de bentonita.....	19
1.2.2.1 Ensayos de Intrusión de Mercurio (MIP). Porosimetrías.....	20
1.2.2.2 Ensayos de porosimetría sobre un pellet.....	24
1.3 Preparación de las mezclas de pellets de bentonita.....	24
1.3.1 Ensayos preliminares y selección de la mezcla óptima.....	25
1.3.1.1 Evolución del contenido de agua por fracción.....	26
1.3.1.2 Ensayos de infiltración.....	27
1.3.1.3 Selección de la mezcla óptima.....	29
1.4 Caracterización de la estructura interna de las mezclas de pellets de bentonita.....	30
1.4.1 Fabricación de muestras.....	31
1.4.2 Ensayos de porosimetría (MIP) realizados sobre mezclas de pellets.....	32
1.4.3 Observación de la estructura interna utilizando microscopio electrónico (ESEM).....	34
1.4.4 Características fundamentales.....	35

1.4.4.1 Estructura interna de las mezclas de pellets.....	35
1.4.4.2 Efecto de la compactación en la estructura interna.....	36
1.4.4.3 Análisis fractal del espacio poroso.....	36
Capítulo 2: Técnicas de medida y control de la succión y equipo experimental.....	59
2.1 El concepto de succión en el suelo.....	60
2.1.1 Componentes de la succión.....	62
2.1.1.1 Succión matricial.....	62
2.1.1.2 Succión osmótica.....	63
2.1.1.3 Succión total.....	63
2.2 Técnicas experimentales de control y medida de la succión.....	64
2.2.1 Control de succión por traslación de ejes.....	64
2.2.2 Control de la succión por transferencia de vapor.....	66
2.2.3 Medida de la succión utilizando un psicómetro de transistores.....	71
2.3 Equipo experimental utilizado.....	71
2.3.1 Equipamiento para la caracterización del comportamiento de cambio volumétrico.....	72
2.3.1.1 Célula edométrica convencional.....	73
2.3.1.2 Célula edométrica con control de succión.....	73
2.3.1.3 Célula de volumen constante con control de tensión vertical.....	76
2.3.1.4 Célula edométrica con control de tensión lateral.....	79
2.3.2 Equipamiento para la determinación de las características hidráulicas.....	81
2.3.2.1 Célula de infiltración con control de tensión vertical.....	82
2.3.2.2 Célula de infiltración de volumen constante.....	83
2.3.3 Columna de infiltración.....	84
2.3.3.1 Descripción de la columna de infiltración.....	85
2.3.3.2 Sensores y sistema de inyección.....	86
2.3.3.3 Sistema de adquisición, almacenamiento de datos.....	89
2.3.3.4 Calibración.....	89
Capítulo 3: Metodología y programa experimental.....	124
3.1 Comportamiento hidráulico.....	126
3.1.1 Ensayo de permeabilidad saturada.....	126
3.1.2 Ensayos de infiltración.....	127
3.1.2.1 Ensayos de infiltración en células de volumen constante.....	128
3.1.2.2 Ensayos de infiltración y almacenamiento.....	129

3.1.3	Curvas de retención a volumen constante.....	130
3.1.3.1	Curva de retención a volumen constante utilizando transferencia de vapor (300-3 MPa).....	131
3.1.3.2	Curva de retención a volumen constante utilizando traslación de ejes (1.5MPa – saturación).....	131
3.1.3.3	Medida de la curva de retención con psicrómetro de transistores.....	132
3.2	Comportamiento de hinchamiento, expansión y compresibilidad....	133
3.2.1	Ensayos de hinchamiento bajo carga.....	133
3.2.2	Ensayos de presión de hinchamiento.....	133
3.2.3	Ensayos con succión controlada. Estudio de la compresibilidad.....	134
3.2.4	Ensayos con control de la succión.....	135
3.2.4.1	Ensayos de humedecimiento a carga constante.....	135
3.2.4.2	Ensayos de humedecimiento a volumen constante.....	135
3.3	Influencia del tipo de transferencia y del ritmo de inyección de agua.....	137
3.3.1	Ensayos de humedecimiento por transferencia de vapor y por transferencia líquida.....	137
3.3.1.1	Ensayo de humedecimiento a carga constante.....	138
3.3.1.2	Ensayos de humedecimiento a volumen constante.....	138
3.3.2	Ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando distintos ritmos de inyección de agua. Ensayos de presión de hinchamiento.....	139
	Capítulo 4: Resultados experimentales.....	153
4.1	Caracterización del comportamiento hidráulico.....	153
4.1.1	Ensayos de permeabilidad saturada.....	153
4.1.2	Ensayos de infiltración.....	155
4.1.2.1	Ensayos de infiltración en células de volumen constante.....	155
4.1.2.2	Ensayos de infiltración y almacenamiento.....	158
4.1.3	Curvas de retención a volumen constante.....	160
4.2	Comportamiento de hinchamiento, expansión y compresibilidad....	162
4.2.1	Ensayos de hinchamiento bajo carga. Ensayos de humedecimiento a carga constante.....	162
4.2.2	Ensayos de presión de hinchamiento. Humedecimiento a volumen constante.....	164
4.2.3	Compresibilidad del material. Ensayos con control de la succión.....	168
4.2.3.1	Compresibilidad elástica $\kappa(s)$ y elastoplástica $\lambda(s)$	171
4.2.3.2	Límite de fluencia (carga de preconsolidación).....	172
4.2.3.3	Interpretación de resultados.....	175

4.2.4	Ensayos de humedecimiento con control de la succión.....	178
4.2.4.1	Ensayos de humedecimiento a carga constante.....	178
4.2.4.2	Ensayos de humedecimiento a volumen constante.....	180
4.3	Efecto del tipo de transferencia y del gradiente hidráulico en el comportamiento de hinchamiento del material.....	181
4.3.1	Transferencia líquida Vs transferencia de vapor. Ensayos de humedecimiento a carga constante.....	182
4.3.2	Transferencia líquida Vs transferencia de vapor. Ensayos de humedecimiento a volumen constante (Presión de hinchamiento).....	184
4.3.3	Efecto del gradiente de inyección de agua en ensayos de presión de hinchamiento.....	186
4.4	Resumen y comentarios generales.....	188
Capítulo 5: Marco conceptual y modelo constitutivo para materiales expansivos.....		237
5.1	Modelo constitutivo para suelos expansivos estructurados.....	241
5.2	Bases del modelo.....	242
5.3	Modelo en condiciones de carga isotrópica.....	243
5.3.1	Nivel microestructural.....	244
5.3.1.1	Régimen elástico.....	244
5.3.1.2	Superficie de fluencia.....	245
5.3.1.3	Régimen elastopástico.....	245
5.3.1.4	Endurecimiento.....	246
5.3.1.5	Síntesis del comportamiento del modelo microestructural.....	246
5.3.2	Nivel macroestructural.....	247
5.3.2.1	Régimen elástico.....	247
5.3.2.2	Superficie de fluencia.....	248
5.3.2.3	Régimen elastopástico.....	249
5.3.2.4	Endurecimiento.....	249
5.3.2.5	Síntesis del comportamiento del modelo macroestructural.....	249
5.4	Modelo en condiciones de carga triaxial.....	251
5.4.1	Nivel microestructural.....	251
5.4.2	Nivel macroestructural.....	252
5.5	Interacción y acoplamiento entre niveles estructurales.....	252
5.5.1	Idealización del medio y dinámica de flujo.....	253
5.5.2	Acoplamiento y compatibilidad entre niveles estructurales.....	254

Capítulo 6: Implementación del modelo.....	268
6.1 Planteo del problema y ecuaciones para la microestructura.....	268
6.1.1 Compatibilidad entre deformaciones y desplazamientos para la microestructura.....	269
6.1.2 Balance de masa micro y ley de Darcy.....	270
6.1.3 Equilibrio de Tensiones.....	271
6.1.4 Compatibilidad y Modelo Constitutivo.....	272
6.2 Ecuaciones para la macroestructura.....	272
6.2.1 Compatibilidad entre deformaciones y desplazamientos para la macroestructura.....	273
6.2.2 Balance de masa macro y ley de Darcy.....	275
6.2.3 Equilibrio de Tensiones.....	276
6.2.4 Compatibilidad y Modelo Constitutivo.....	276
6.3 Planteo e implementación del sistema de ecuaciones mediante la técnica de las diferencias finitas.....	276
6.4 Estrategia de resolución iterativa.....	279
Capítulo 7: Deducción de parámetros y comportamiento previsto por el modelo.....	287
7.1 Deducción de los parámetros del modelo.....	287
7.1.1 Parámetros de la microestructura.....	287
7.1.1.1 Dominio elástico.....	287
7.1.1.2 Superficie de fluencia y parámetros de comportamiento plástico.....	288
7.1.1.3 Deducción de parámetros micro.....	288
7.1.2 Parámetros de la macroestructura.....	291
7.1.2.1 Dominio elástico.....	291
7.1.2.2 Superficie de fluencia y parámetros del comportamiento plástico.....	292
7.1.2.3 Determinación de parámetros macro.....	292
7.2 Comportamiento previsto por el modelo.....	295
7.2.1 Trayectorias de humedecimiento a carga constante. Influencia de la velocidad de mojado.....	295
7.2.1.1 Ensayo de inyección considerando $h=30$ m.....	296
7.2.1.2 Ensayo de inyección considerando $h=3$ cm.....	297
7.2.2 Trayectorias de humedecimiento a volumen constante. Ensayos de presión de hinchamiento considerando muestras con diferente densidad seca.....	297
7.2.2.1 Ensayo sobre muestra con densidad seca inicial 1.3 Mg/m^3	298
7.2.2.2 Ensayo sobre muestra con densidad seca inicial 1.5 Mg/m^3	299

Capítulo 8: Comparación entre el comportamiento real y el previsto por el modelo.....	310
8.1 Ensayos de mojado a carga constante. Transferencia líquida y transferencia de vapor.....	311
8.1.1 Descripción de los ensayos y comportamiento experimental observado.....	311
8.1.2 Interpretación y modelación constitutiva.....	312
8.1.2.1 Ensayo de humedecimiento por inundación con agua líquida.....	313
8.1.2.2 Ensayo de humedecimiento por transferencia de vapor.....	313
8.1.3 Modelación hidromecánica acoplada.....	314
8.1.3.1 Ensayos de mojado a carga constante por inundación.....	314
8.1.3.2 Ensayo de mojado a carga constante utilizando transferencia de vapor.....	315
8.2 Ensayos de presión de hinchamiento.....	316
8.2.1 Descripción del ensayo. Resultados e interpretación del comportamiento observado.....	316
8.2.2 Modelación acoplada Vs. Resultados experimentales.....	316
8.3 Ensayos de humedecimiento a volumen constante. Influencia de la presión de inyección de agua.....	317
8.3.1 Descripción de los ensayos y comportamiento experimental observado.....	318
8.3.2 Modelación acoplada Vs resultados experimentales.....	319
8.3.2.1 Ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando un gradiente de inyección de 20 m.....	319
8.3.2.2 Ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando un gradiente de inyección de 2 m.....	320
8.4 Interacción entre niveles estructurales micro-macro. Funciones de interacción (Gens & Alonso, 1992).....	321
8.4.1 Aspectos estructurales y fenomenológicos del acoplamiento entre niveles estructurales.....	322
8.4.2 Planteo del acoplamiento constitutivo entre los distintos niveles estructurales utilizando funciones de interacción.....	323
8.4.3 Formulación del acoplamiento constitutivo.....	325
8.4.3.1 Reformulación del modelo macroestructural.....	325
8.4.3.2 Comportamiento previsto considerando el acoplamiento constitutivo.....	326
8.5 Resumen de Tablas.....	328
Capítulo 9: Ensayo de Columna de Infiltración.....	349
9.1 Descripción del ensayo.....	349
9.1.1 Preparación del dispositivo de ensayo.....	350

9.1.2	Control y calibración del sistema.....	350
9.1.3	Preparación de la muestra.....	351
9.1.4	Inyección de agua.....	352
9.1.5	Resultados experimentales.....	353
9.1.5.1	Evolución de la inyección de agua.....	353
9.1.5.2	Evolución de las tensiones. Presión de hinchamiento.....	354
9.1.6	Fin de ensayo y análisis de la muestra.....	356
Capítulo 10: Resumen, conclusiones y líneas de trabajo futuro.....		375
10.1	Resumen.....	375
10.2	Conclusiones.....	377
10.2.1	Metodología de trabajo.....	377
10.2.2	Resultados experimentales.....	378
10.2.2.1	Características geotécnicas y estructurales del material.....	379
10.2.2.2	Comportamiento hidráulico.....	380
10.2.2.3	Comportamiento de expansión, hinchamiento y compresibilidad.....	381
10.2.2.4	Efecto de la forma de transferencia y de inyección de agua.....	382
10.2.3	Marco conceptual y modelo constitutivo.....	383
10.2.3.1	Modelo planteado.....	383
10.2.3.2	Deducción de parámetros.....	384
10.2.3.3	Capacidades del modelo y comparación con el comportamiento real.....	384
10.3	Líneas de trabajo futuro.....	385
10.3.1	Técnicas y equipos de ensayo.....	385
10.3.2	Estudios experimentales.....	386
10.3.3	Estudios constitutivos.....	386

Referencias

Anexos