



Departamento de Ingeniería del Terreno,  
Cartográfica y Geofísica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL  
COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO DE  
UNA ARCILLA COMPACTADA.

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:

Carlos Manuel Buenfil Berzunza

Directores de tesis:

Antonio Lloret Morancho

Antonio Gens Solé

---

Barcelona, Septiembre de 2007

## ÍNDICE

Lista de figuras.....	xvii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS.....	1
1.1 Introducción y antecedentes.....	1
1.2 Objetivos del trabajo.....	7
1.3 Organización de la tesis.....	8
CAPÍTULO 2. COMPORTAMIENTO DE SUELOS NO SATURADOS. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Fábrica de suelos compactados. ....	12
2.2.1 Fábrica.....	12
2.2.2 Influencia de la humedad de compactación sobre la fábrica. ....	14
2.2.3 Influencia del nivel de energía sobre la fábrica.....	15
2.3 Características de la interacción agua-suelo. ....	16
2.3.1 Succión en suelos no saturados. ....	16
2.3.2 Curvas de retención. ....	17
2.3.3 Succión en suelos compactados. ....	22
2.4 Estado de tensiones en suelos parcialmente saturados. ....	25
2.4.1 Tensiones efectivas y variables de estado. ....	25
2.4.2 Variables de deformación conjugadas al trabajo. ....	26
2.5 Equipo triaxial para suelos no saturados. ....	28
2.5.1 Generalidades. ....	28
2.5.2 Control de succión en una célula triaxial. Traslación de ejes. ....	29
2.5.3 Medida de cambio de volumen. ....	34
2.6 Comportamiento mecánico de suelos de baja plasticidad no saturados. ....	37
2.6.1 Fenómenos de colapso e hinchamiento.....	37
2.6.2 Colapso en suelos compactado. ....	40
2.6.3 Aumento de la rigidez y el grado de sobre consolidación en suelos no saturados.....	45
2.6.4 Presión de sobreconsolidación y compresibilidad en suelos compactados....	47
2.6.5 Colapso de suelos bajo tensiones anisótropas. ....	49
2.6.6 Anisotropía.....	51
2.6.7 Rigidez y resistencia al corte. ....	53
2.7 Modelos para suelos no saturados. ....	55
2.7.1 Superficies de estado.....	55
2.7.2 Modelos elastoplásticos de estado crítico para suelos no altamente expansivos.....	56
2.7.3 Modelos elastoplásticos en suelos compactados. ....	66
CAPÍTULO 3. EQUIPO EXPERIMENTAL Y TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN.....	75
3.1 Introducción.....	75
3.2 Sistemas de presión de aire y presión de agua.....	76

3.3 Implementación de una nueva célula triaxial con control de succión, instrumentada electrónicamente.....	78
3.3.1 Descripción general de la célula triaxial con control de succión.....	78
3.3.2 Control del estado de tensiones del espécimen.....	85
3.3.2.1 Estado de tensiones en ensayos triaxiales con succión controlada.....	85
3.3.2.2 Aplicación y control de la tensión radial o presión de confinamiento	86
3.3.2.3 Aplicación y control de la tensión de corte.....	86
3.3.2.3.1 Medida de la tensión de corte.....	87
3.3.2.3.2 Control de la tensión de corte mediante un sistema de motores paso a paso.....	88
3.3.2.3.3 Efecto de la presión de confinamiento sobre la aplicación de la tensión de corte.....	94
3.3.2.4 Control de la succión matricial.....	97
3.3.2.4.1 Traslación de ejes.....	97
3.3.2.5 Descripción del sistema de control automatizado de presiones.....	99
3.3.3 Medidas del estado de la muestra.....	100
3.3.3.1 Medidas de cambio de volúmenes.....	102
3.3.3.2 Transductores de desplazamiento axial.....	102
3.3.3.2.1 Descripción de los LVDTs.....	103
3.3.3.2.2 Efecto de la deformación del equipo sobre la medida externa de la deformación axial.....	105
3.3.3.3 Transductores de desplazamiento radial.....	107
3.3.3.3.1 Descripción de los sensores láser eléctrico-ópticos.....	107
3.3.3.3.2 Evaluación de su fiabilidad y calibraciones ante cambio de presiones de confinamiento.....	113
3.3.3.3.3 Perfiles de la muestra.....	117
3.3.3.3.4 Efecto de la presión de confinamiento sobre las medidas de desplazamiento lateral a lo largo de la muestra.....	119
3.3.3.3.5 Medidas de cambios de volumen local y global de la muestra.....	120
3.3.3.4 Medida de variación de volumen de agua dentro de la muestra.....	126
3.3.3.4.1 Descripción del sistema de buretas instrumentadas con TPDs.....	126
3.3.3.4.2 Fiabilidad y precisión de las medidas. Calibraciones ante cambios de presión de agua.....	129
3.3.3.5 Sistema de adquisición de datos.....	132
3.3.3.5.1 Sistema de adquisición de datos y control.....	132
3.3.6 Consideraciones sobre el montaje de los ensayos triaxiales.....	136
3.3.7 Correcciones por área y por membrana.....	139
3.3.7.1 Corrección por área.....	139
3.3.7.2 Corrección por membrana.....	140
3.4 Equipos experimentales complementarios.....	143
3.4.1 Célula edométrica con medida de presión lateral.....	143
3.4.2 Célula triaxial automática (GDS instrument Ltd.).....	145

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACION DEL SUELO USADO DURANTE LA INVESTIGACIÓN.....	149
4.1 Origen geológico y composición del suelo.....	149
4.1.1 Origen del suelo.....	149
4.1.2 Granulometría.....	150
4.1.3 Límites de consistencia.....	152
4.2 Pruebas de compactación estática y curvas de compactación.....	153
4.3 Suelo compactado usado durante la investigación y descripción del proceso de preparación de la muestra.....	159
4.4 Trayectoria de tensión lateral durante la compactación estática.....	164
4.5 Descripción de la fábrica del suelo compactado.....	168
4.5.1. Estudio de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP).....	169
4.5.1 Estudio por Microscopio Electrónico de Barrido Ambiental (ESEM).....	173
4.6 Curvas de retención del suelo compactado usado durante la investigación.....	175
4.6.1 Curvas de retención obtenidas con equipo edométrico con control de succión.....	175
4.6.2 Curvas de retención obtenidas con base a los resultados de la MIP.....	180
CAPÍTULO 5. PROGRAMA Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	183
5.1. Introducción.....	183
5.2. Programa y trayectorias de los ensayos triaxiales no saturados.....	185
5.2.1. Trayectoria de tensiones seguidas en los ensayos triaxiales no saturados.....	187
5.3. Procedimiento en los ensayos no saturados.....	192
5.3.1. Montaje del espécimen.....	194
5.3.1.1 Saturación de discos cerámicos. Medida de cambios de volumen de suelo.....	194
5.3.1.2 Montaje del espécimen.....	196
5.3.1.3 Aplicación de la sobrepresión de aire.....	197
5.3.2. Etapa de equilibrio.....	199
5.3.3. Etapa de consolidación isótropa.....	202
5.3.4. Etapa de consolidación anisótropa.....	207
5.3.5. Etapa de humedecimiento con succión controlada.....	214
5.3.6. Etapa de corte.....	221
5.3.7. Medidas finales.....	222
5.4. Programa y trayectorias de los ensayos triaxiales saturados.....	223
5.4.1. Introducción.....	223
5.4.2. Etapa de saturación.....	225
5.4.3. Trayectorias de tensiones y programa de ensayos triaxiales en muestras saturadas.....	229
CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CONSOLIDACION Y REDUCCION DE SUCCION.....	233
6.1. Introducción.....	233
6.2. Etapa de equilibrio. Trayectorias de humedecimiento o secado en bajas cargas. Resultado y su interpretación.....	235

6.2.1.	Descripción de trayectorias de secado y mojado en bajas cargas.....	235
6.2.2.	Cambios de relación de agua durante las trayectorias de secado y mojado.....	236
6.2.3.	Cambios de deformación volumétrica durante las trayectorias de secado y mojado.....	246
6.2.4.	Cambios de grado de saturación durante las trayectorias de secado y mojado	250
6.2.5.	Cambios de deformación de corte durante las trayectorias de secado y mojado.....	254
6.3.	Consolidación isótropa con succión matricial constante. ....	262
6.3.1.	Consolidación isótropa mediante rampa de incrementos de presiones bajo condiciones saturadas de la muestra.....	262
6.3.2.	Consolidación isótropa con control de succión.....	270
6.3.2.1.	Descripción de trayectorias de consolidación isótropa bajo succión controlada. ....	270
6.3.2.2.	Compresibilidad del suelo a distintas succiones.....	271
6.3.2.3.	Cambios de deformación de corte.....	280
6.3.2.4.	Cambios de grado de saturación durante las trayectorias de consolidación isótropa.....	284
6.4.	Consolidación anisótropa bajo succión matricial constante.....	292
6.4.1.	Consolidación bajo condiciones saturadas.....	292
6.4.1.1.	Descripción de trayectorias.....	292
6.4.1.2.	Características tensión-deformación y tensiones de fluencia.....	294
6.4.2.	Consolidación no saturada bajo succión matricial constante.....	305
6.4.2.1.	Descripción de trayectorias.....	305
6.4.2.2.	Características tensión-deformación y tensiones de fluencia.....	305
6.4.2.3.	Comparación entre consolidación bajo succión matricial constante de 100 kPa y consolidación bajo condiciones saturadas.....	328
6.5.	Características del colapso inducido por mojado bajo diferentes relaciones de tensión.....	333
6.5.1.	Descripción de trayectorias.....	333
6.5.2.	Resultados del comportamiento del suelo.....	335
CAPÍTULO 7. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL CORTE TRIAXIAL.....		361
7.1.	Introducción.....	361
7.2.	Ensayos de compresión triaxial sobre muestras saturadas.....	361
7.3.	Ensayos de compresión triaxial con succión controlada.....	372
7.3.1.	Medidas de cambio de volumen local y global de la muestra durante compresión triaxial.....	372
7.3.2.	Ensayos de compresión triaxial a distinta succión matricial e igual tensión media neta.....	383
7.3.2.1.	Trayectoria de tensiones. ....	383
7.3.2.2.	Resultados experimentales. ....	388
7.3.3.	Ensayos de compresión triaxial a distinta tensión media neta e igual succión matricial de 100 kPa.....	402
7.3.3.1	Trayectoria de tensiones.....	402
7.3.3.2.	Resultados experimentales.....	402

7.3.4. Ensayo IWD. Humedecimiento y secado, previo a trayectorias de consolidación y compresión triaxial bajo succión matricial de 100 kPa.....	405
7.3.4.1 Trayectoria de tensiones.....	405
7.3.4.2. Resultados experimentales.....	405
7.3.5. Ensayo I3. Compresión triaxial bajo succión matricial de 10 kPa.....	418
7.3.6. Ensayo AW.....	421
7.3.7. Medidas finales.....	425
7.4. Líneas de estado crítico.....	428
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION.....	445
8.1 Síntesis del trabajo. Conclusiones.....	445
8.1.1 Caracterización del suelo usado.....	445
8.1.2 Desarrollo de una nueva célula triaxial con control de succión, instrumentada electrónicamente.....	446
8.1.3 Resultados experimentales.....	449
8.2 Líneas futuras de investigación.....	458
8.2.1 Mejora del equipo triaxial y procedimientos.....	458
8.2.2 Estudios experimentales.....	459
ANEXO A Resultado de calibraciones de la célula de carga y los LVDT.....	463
REFERENCIAS.....	467

