

## Índice de Figuras

Figura I.1- Producción de energía a nivel mundial.....	10
Figura I.2- Evolución del número de reactores nucleares activos entre 1956 y 2003 a nivel mundial.....	10
Figura I.3- Evolución del número de reactores nucleares activos entre 1956 y 2003 en Estados Unidos y Europa Occidental.....	11
Figura I.4- Esquema de diseño de un almacenamiento profundo.....	11
Figura I.5 – Concepto de almacenamiento propuesto y estudiado en el proyecto FEBEX.....	12
Figura I.6 – Concepto propuesto en el Proyecto EB para el almacenamiento profundo de residuos radioactivos.....	12
Figura I.7 – Proyecto EB. Diagrama de ejecución de las distintas actividades del proyecto.....	13
Figura I.8- Esquema del sistema de inyección de agua por niveles utilizada para lograr la saturación de la barrera.....	13
Figura 1.1- Minerales de arcilla. Silicatos y aluminatos.....	39
Figura 1.2- Minerales arcillosos. a)- Kaolinita, b)- Illita, c)- Montmorillonita.....	39
Figura 1.3- Usos de la bentonita.....	40
Figura 1.4- Esquema del proceso de fabricación de los pellets de bentonita.....	41
Figura 1.5- Almacenamiento de mezclas de pellets en bolsas herméticamente cerradas.....	42
Figura 1.6- Relación entre el diámetro de poro y la presión de mercurio.....	42
Figura 1.7- Porosímetro de mercurio. a)-Porosímetro Micromeritics AutoPore 9500. b)- Penetrometro. c)- Detalle de muestra de bentonita preparada para ensayo.....	43
Figura 1.8- Puertos de presión. (a)-baja. (b)- alta.....	43
Figura 1.9- Resultados obtenidos en un ensayo de intrusión de mercurio. Curva de intrusión y extrusión.....	44
Figura 1.10- Porosimetrías obtenidas en muestras de basalto triturado. (a) Muestra compactada estáticamente (b) Muestra compactada en forma dinámica (Adaptado de Mitchell 1993).....	44
Figura 1.11- Resultados obtenidos en un ensayo de intrusión de mercurio sobre un pellet.....	45
Figura 1.12- Pellets clasificados por tamaño.....	46
Figura 1.13- Concepto de optimización de vacíos propuesto por Fuller. Curva de distribución granulométrica tipo Fuller, propuesta como punto de partida para el estudio de la curva óptima.....	46
Figura 1.14- Evolución del contenido de agua de las diferentes fracciones en equilibrio con el ambiente del laboratorio. Humedad relativa controlada en HR(%)=50.....	47
Figura 1.15- Célula de infiltración utilizada en los ensayos preliminares.....	48

Figura 1.16- Edómetro de palanca utilizado para realizar ensayos de infiltración preliminar.....	48
Figura 1.17- Resultados obtenidos en ensayos preliminares. a)- Evolución del grado de saturación. b)- Presión de hinchamiento vertical.....	49
Figura 1.18- Ensayo de infiltración en célula de metacrilato. a)- Vista general. b)- Material compactado. c)- Frente de hidratación luego de la inundación inicial.....	50
Figura 1.19- Curvas granulométricas óptimas para tamaños máximos de pellets de 4, 10 y 15 mm.....	50
Figura 1.20- Proceso de compactación estática de muestras.....	51
Figura 1.21- Tensión vertical de compactación en función de la densidad seca.....	52
Figura 1.22- Evolución del índice de vacíos con la tensión vertical durante el proceso de compactación de las muestras.....	52
Figura 1.23- Granulometría inicial y granulometría modificada por efecto de la compactación a una densidad seca de $1.5 \text{ Mg/m}^3$ .....	53
Figura 1.24- Evolución de $K_0$ a lo largo del proceso de compactación.....	53
Figura 1.25- Ensayo de intrusión de mercurio sobre una muestra de pellets sin compactación.....	54
Figura 1.26- Ensayos de intrusión de mercurio sobre muestras de pellets compactadas a distintos valores de densidad seca.....	55
Figura 1.27- Comparación de resultados obtenidos en ensayos de intrusión de mercurio realizados sobre una muestra de pellets y una muestra fabricada con bentonita FEBEX. ....	56
Figura 1.28- Observación de la estructura interna de una muestra de pellets con densidad $\rho_d=1.50 \text{ Mg/m}^3$ utilizando un microscopio de electrones (ESEM), 700 y 1500 aumentos.....	57
Figura 1.29- Mecanismos de compactación. a)- Efecto del mecanismo de reordenamiento y “crushing” o rotura de pellets en la curva de distribución de poros. b)- Mecanismo de coalescencia de poros.....	57
Figura 1.30- Triángulos de Sierpinsky. Algoritmo de generación del conjunto fractal.....	58
Figura 1.31- Dimensión fractal del espacio poroso entre pellets obtenido a partir de Anderson & McBear (1995).....	58
Figura 2.1-a) Ascensión de agua por capilaridad dentro de un tubo de pequeño radio. b)- Ascensión capilar en función del radio del menisco de la interfase agua-aire.....	90
Figura 2.2-Diagrama de fases del suelo para una arena en la zona de ascensión capilar.....	90
Figura 2.3- Succión total y sus componentes. a)-Componente matricial. b)-Componente osmótica. c)- Succión total.....	91
Figura 2.4- Esquema del funcionamiento de un elemento separador utilizado en la técnica de control de succión por traslación de ejes.....	92
Figura 2.5- Membranas de acetato utilizadas como elemento separador en la técnica de traslación de ejes.....	92

Figura 2.6- Piedras porosas utilizadas para la técnica de traslación de ejes y base metálica para su “instalación”.....	93
Figura 2.7- Esquema del funcionamiento de la técnica de traslación de ejes para el control de la succión aplicada sobre la muestra.....	93
Figura 2.8- Verificación del funcionamiento de la técnica de traslación de ejes.....	94
Figura 2.9- Aplicación de la técnica de transferencia de vapor por difusión.....	95
Figura 2.10- Aplicación de la técnica de transferencia de vapor por convección forzada.....	96
Figura 2.11- Variación de la presión de vapor con la temperatura para el caso de una solución saturada de sulfato de cobre $\text{CuSO}_4$ .....	97
Figura 2.12- Densímetros de flotación utilizados para el control de la concentración de las soluciones de ácido sulfúrico.....	97
Figura 2.13- Succión aplicada utilizando la técnica de transferencia de vapor, para el caso de soluciones acuosas de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en función de la densidad de la solución.....	98
Figura 2.14- Esquema y vista de uno de los sensores de un psicrómetro de transistores, Woodburn, J.A. 1995.....	98
Figura 2.15- Equipo utilizado para medir la succión, psicrómetro de transistores tipo SMI. a)- Equipo. b)- Sensor. c)- Portamuestras. d)- Muestra analizada.....	99
Figura 2.16- Célula edométrica convencional.....	100
Figura 2.17- Célula edométrica convencional. ....	100
Figura 2.18- Edómetro de palanca utilizado en la aplicación de carga en ensayos realizados con las células edométricas convencionales.....	101
Figura 2.19- Célula edométrica con control de succión (UPC, 2002).....	101
Figura 2.20- Esquema de célula edométrica con control de succión (UPC, 2002).....	102
Figura 2.21- Partes de la célula edométrica con control de succión (UPC, 2002).....	103
Figura 2.22- Célula edométrica con control de succión. Base apoya muestra, marco rígido y diferentes bases para la aplicación de las distintas técnicas de control de succión.....	104
Figura 2.23- Anillo porta muestras con muestra compactada.....	105
Figura 2.24- Cuerpo central del equipo. Conexiones para realizar diferentes tipos de ensayos.....	105
Figura 2.25- Parte superior. Tapa y pistón de carga.....	106
Figura 2.26- Marco rígido para fijar el sistema de medida de deformación vertical (Micrómetro o LVDT).....	107
Figura 2.27- Edómetro con control de la succión y dispositivos auxiliares para aplicar la traslación de ejes.....	107
Figura 2.28- Célula edométrica de volumen constante con control de la tensión vertical.....	108
Figura 2.29- Célula edométrica de volumen constante. Detalle de las piezas.....	108

Figura 2.30- Esquema de la célula de carga utilizada para la medida de la presión de hinchamiento vertical.....	109
Figura 2.31- Esquema de funcionamiento de la célula de carga.....	109
Figura 2.32- Edómetro con anillo semirígido instrumentado para el control de la tensión lateral.....	110
Figura 2.33- Edómetro con control de tensión lateral.....	110
Figura 2.34- Anillo del edómetro de tensión lateral. Distribución de las galgas extensométricas.....	111
Figura 2.35- Edómetro con control de la tensión lateral acondicionado para realizar ensayos de hinchamiento a volumen constante con control de la tensión vertical.....	112
Figura 2.36- Célula de infiltración con control de la tensión vertical.....	112
Figura 2.37- Célula de infiltración de volumen constante.....	113
Figura 2.38- Célula de infiltración de volumen constante.....	113
Figura 2.39- Dispositivos auxiliares utilizados en los ensayos de infiltración realizados en las células de volumen constante.....	114
Figura 2.40- Vista general de la columna de infiltración.....	115
Figura 2.41- Distintas partes de la base de la columna de infiltración.....	116
Figura 2.42- Distintas partes del cuerpo central de la columna de infiltración.....	117
Figura 2.43- Vista en corte del cuerpo central de la columna de infiltración.....	118
Figura 2.44- Parte superior de la columna de infiltración.....	119
Figura 2.45- Sensores y sistema de fijación.....	120
Figura 2.46- Célula de carga para la presión vertical de hinchamiento (Sensotec LFH71, 10 klbs).....	121
Figura 2.47- Sensores de presión total para la medida de la presión total horizontal. a)- Sensor sin adaptar. b)- Vista del sensor adaptado y nicho de la camisa. c)- Vista del sensor instalado.....	122
Figura 2.48- Sistema de control de la inyección de agua (GDS).....	123
Figura 3.1. Sistema de inyección. Detalle de sistema de inyección y zonas con distinta transferencia.....	140
Figura 3.2- Dispositivo de ensayo utilizado en ensayos de permeabilidad saturada.....	141
Figura 3.3- Evolución de la presión de inyección de agua aplicada en los ensayos de infiltración.....	141
Figura 3.4- Dispositivo de ensayo utilizado en ensayos de infiltración en células de volumen constante.....	142
Figura 3.5- Esquema de ensayo de infiltración y almacenamiento en células de volumen constante.....	142
Figura 3.6. Dispositivo de ensayo utilizado en ensayos de infiltración y almacenamiento en células de volumen constante.....	143

Figura 3.7. Dispositivo de ensayo utilizado para la obtención de las curvas de retención a volumen constante utilizando transferencia de vapor.....	144
Figura 3.8- Dispositivo de ensayo utilizado para la obtención de las curvas de retención a volumen constante utilizando la traslación de ejes.....	145
Figura 3.9- Dispositivo de ensayo utilizado en los ensayos de humedecimiento a carga constante.....	145
Figura 3.10- Dispositivo de ensayo utilizado en los ensayos de presión de hinchamiento (humedecimiento a volumen constante).....	146
Figura 3.11- Dispositivo de ensayo utilizado en los ensayos de compresibilidad. Carga a succión constante.....	147
Figura 3.12. Dispositivo de ensayo utilizado para ensayos de compresibilidad utilizando traslación de ejes.....	148
Figura 3.13- Trayectorias de tensiones aplicadas en ensayos de compresibilidad.....	148
Figura 3.14- Dispositivo utilizado en ensayos de presión de hinchamiento con control de la succión.....	149
Figura 3.15- Trayectorias de humedecimiento a carga constante con distintas técnicas de humedecimiento. Transferencia de vapor y transferencia líquida.....	150
Figura 3.16- Trayectorias de humedecimiento a volumen constante con distintas técnicas de humedecimiento. Transferencia de vapor y transferencia líquida.....	150
Figura 3.17- Dispositivo utilizado en ensayos de hinchamiento a volumen constante con un gradiente de inyección de agua de 2 m.....	151
Figura 3.18- Dispositivo utilizado en ensayos de hinchamiento a volumen constante con un gradiente de inyección de agua de 20 m.....	152
Figura 4.1- Evolución de la permeabilidad saturada con la densidad seca del material.....	191
Figura 4.2- Evolución de la presión de inyección durante la fase inicial de los ensayos de infiltración realizados en células de volumen constante (75x100 mm).....	191
Figura 4.3- Evolución del volumen de agua inyectado durante los ensayos de infiltración “rápida” y “lenta”.....	192
Figura 4.4- Evolución del contenido de agua y del grado de saturación en la muestra durante los ensayos de infiltración. a)- Inyección “rápida”. b)- Inyección “lenta”.....	193
Figura 4.5- Evolución de la densidad seca en la muestra durante los ensayos de infiltración. a)- Inyección “rápida”. b)- Inyección “lenta”.....	194
Figura 4.6- Planteo del ensayo de infiltración y almacenamiento sobre una muestra de pellets.....	194
Figura 4.7- Evolución del volumen de agua entrante y saliente de la muestra durante el ensayo de infiltración y almacenamiento.....	195
Figura 4.8- Evolución en el tiempo del grado de saturación obtenido en ensayos de infiltración y almacenamiento.....	195

Figura 4.9- Evolución de la permeabilidad en función del tiempo durante un ensayo de infiltración y almacenamiento.....	196
Figura 4.10- Evolución de la permeabilidad con el grado de saturación obtenido en ensayos de infiltración y almacenamiento.....	196
Figura 4.11- Curva de retención correspondiente a una muestra de pellets de bentonita a una densidad seca de $1.3 \text{ Mg/m}^3$ .....	197
Figura 4.12- Curva de retención correspondiente a una muestra de pellets de bentonita a una densidad seca de $1.5 \text{ Mg/m}^3$ .....	198
Figura 4.13- Curva de retención correspondiente a una muestra de pellets de bentonita a una densidad seca de $1.9 \text{ Mg/m}^3$ .....	199
Figura 4.14- Curvas de retención en trayectorias de humedecimiento. Muestras con densidades de 1.3, 1.5 y $1.9 \text{ Mg/m}^3$ .....	200
Figura 4.15- Trayectorias de humedecimiento a carga constante para estudiar el hinchamiento del material.....	200
Figura 4.16- Resultados de ensayos de humedecimiento a carga constante. (a)- Compresibilidad del material en condiciones de fábrica ( $s=250 \text{ MPa}$ ). (b)- Comportamiento de hinchamiento por humedecimiento a carga constante.....	201
Figura 4.17- Evolución de la deformación vertical relativa $\Delta H/H_0$ durante ensayo de humedecimiento a carga constante, ( $\rho_d=1.3 \text{ Mg/m}^3$ $\sigma_v=300 \text{ kPa}$ ).....	201
Figura 4.18- Resultados de ensayos de humedecimiento a carga constante realizados sobre muestras con $\rho_d=1.7 \text{ Mg/m}^3$ . (a)-Compresibilidad del material en condiciones de fábrica ( $s=300-250 \text{ MPa}$ ). (b)-Evolución del hinchamiento por humedecimiento a carga constante.....	202
Figura 4.19- Resultados de ensayos de humedecimiento a carga constante obtenidos en muestras con densidad de $\rho_d=1.3 \text{ Mg/m}^3$ y preparadas con distintas granulometrías. (a)- Ensayos con carga vertical de $300 \text{ kPa}$ . (b)- Ensayos con carga vertical de $700 \text{ kPa}$ .....	203
Figura 4.20- Expansión del material en función de la densidad seca habiendo aplicado una trayectoria de carga y humedecimiento (1-2-3) de acuerdo con la Figura 4.15.....	204
Figura 4.21- Trayectorias de humedecimiento a volumen constante.....	204
Figura 4.22- Evolución de la tensión vertical neta, la tensión horizontal neta y el grado de saturación durante los ensayos VC13-1 y VC13-2.....	205
Figura 4.23- Evolución de la tensión vertical neta y la tensión horizontal neta con la succión durante los ensayos VC13-1 y VC13-2.....	206
Figura 4.24- Evolución de la trayectoria de tensiones en el plano tensión media neta succión durante los ensayos VC13-1 y VC13-2.....	207
Figura 4.25- Evolución de la trayectoria de tensiones en el plano ( $p, q$ ) durante los ensayos VC13-1 y VC13-2.....	207
Figura 4.26- Evolución de la tensión vertical neta, la tensión horizontal neta y el grado de saturación durante los ensayos VC15-1 y VC15-2.....	208
Figura 4.27- Evolución de la tensión vertical neta y la tensión horizontal neta con la succión durante los ensayos VC15-1 y VC15-2.....	209

Figura 4.28- Evolución de la tensión media neta con la succión durante los ensayos VC15-1 y VC15-2.....	210
Figura 4.29- Evolución de la trayectoria de tensiones en el plano (p, q) durante los ensayos VC15-1 y VC15-2.....	210
Figura 4.30- Presión de hinchamiento vertical obtenida en ensayos de humedecimiento a volumen constante.....	211
Figura 4.31- Trayectorias de tensiones aplicadas sobre muestras con densidad seca inicial de $1.3 \text{ Mg/m}^3$ .....	211
Figura 4.32- Resultados obtenidos en ensayos de carga a succión constante sobre muestras con densidad seca de $1.30 \text{ Mg/m}^3$ . (a)-Curva de compresibilidad. (b)- Curva de trabajo entregado a la muestra (c)- Evolución de la compresibilidad.....	212
Figura 4.33- Trayectorias de tensiones aplicadas sobre muestras preparadas con una densidad seca de $1.5 \text{ Mg/m}^3$ .....	213
Figura 4.34- Resultados obtenidos en ensayos de carga a succión constante sobre muestras con densidad seca de $1.50 \text{ Mg/m}^3$ . Ensayos C15-sat-1 y C15-60. (a)-Curva de compresibilidad. (b)- Curva de trabajo entregado a la muestra (c)- Evolución de la compresibilidad.....	214
Figura 4.35- Trayectorias de tensiones aplicadas sobre muestras preparadas con una densidad seca de $1.5 \text{ Mg/m}^3$ . Ensayos C15-sat-1 y C15-sat-2.....	215
Figura 4.36- Resultados obtenidos en ensayos de carga a succión constante sobre muestras con densidad seca de $1.50 \text{ Mg/m}^3$ . Ensayos C15-sat-1 y C15-sat-2. (a)-Curva de compresibilidad. (b)- Curva de trabajo entregado a la muestra (c)- Evolución de la compresibilidad.....	216
Figura 4.37- Trayectorias de humedecimiento y carga aplicadas sobre muestras preparadas con una densidad seca de $1.7 \text{ Mg/m}^3$ . Ensayos C17-sat-1 y C17-sat-2.....	217
Figura 4.38- Resultados obtenidos en ensayos de carga a succión constante sobre muestras con densidad seca de $1.70 \text{ Mg/m}^3$ . (a)-Curva de compresibilidad. (b)- Curva de trabajo entregado a la muestra (c)- Evolución de la compresibilidad.....	218
Figura 4.39- Trayectorias de humedecimiento a volumen constante y carga sobre muestras preparadas con una densidad seca de $1.90 \text{ Mg/m}^3$ .....	219
Figura 4.40- Curvas de compresibilidad en trayectorias de humedecimiento a volumen constante y carga. Muestras preparadas con una densidad seca inicial de $1.90 \text{ Mg/m}^3$ . Ensayo C19-sat.....	220
Figura 4.41- Evolución de la compresibilidad con la tensión vertical media neta en trayectorias de carga.....	221
Figura 4.42- Evolución de la compresibilidad elástica para muestras con densidad seca inicial de $1.3 \text{ Mg/m}^3$ . (a) Evolución de la compresibilidad con el nivel de carga. (b)- Evolución de la compresibilidad con la succión.....	222
Figura 4.43- Evolución de la compresibilidad plástica para muestras con densidad seca inicial de $1.3 \text{ Mg/m}^3$ . (a) Evolución de la compresibilidad con el nivel de carga. (b)- Evolución de la compresibilidad con la succión.....	223

Figura 4.44- Evolución de la compresibilidad elástica para muestras con densidad seca inicial de $1.5 \text{ Mg/m}^3$ . (a) Evolución de la compresibilidad con el nivel de carga. (b)- Evolución de la compresibilidad con la succión.....	224
Figura 4.45- Evolución de la compresibilidad plástica para muestras con densidad seca inicial de $1.5 \text{ Mg/m}^3$ . (a) Evolución de la compresibilidad con el nivel de carga. (b)- Evolución de la compresibilidad con la succión.....	225
Figura 4.46- Evolución de la carga de preconsolidación con la succión. Superficie de fluencia LC obtenidas a partir de distintos ensayos de carga a succión constante.....	226
Figura 4.47- Ensayos de humedecimiento a carga constante con control de la succión. Trayectorias de tensiones.....	227
Figura 4.48- Ensayos de humedecimiento a carga constante con control de la succión. Evolución de la deformación vertical de la muestra durante el ensayo.....	227
Figura 4.49- Trayectoria de tensiones aplicadas en cada uno de los ensayos de humedecimiento a carga constante con control de la succión y posición relativa de la superficie LC (a) Ensayo CC15. (b)- Ensayo CC13.....	228
Figura 4.50- Ensayos de humedecimiento a volumen constante con control de la succión.....	229
Figura 4.51- Trayectoria de tensiones en ensayos de humedecimiento a carga constante. (a)- Utilizando inyección de agua líquida (b)- Humedecimiento por transferencia de vapor.....	230
Figura 4.52- Evolución de la deformación volumétrica en ensayos de humedecimiento a carga constante. (a)- Utilizando inyección de agua líquida (b)- Humedecimiento por transferencia de vapor.....	230
Figura 4.53- Ensayos de humedecimiento a carga constante utilizando inyección de agua líquida y humedecimiento por transferencia de vapor.....	231
Figura 4.54- Trayectoria de tensiones en ensayos de humedecimiento a volumen constante. (a)- Utilizando inyección de agua líquida (b)- Humedecimiento por transferencia de vapor.....	232
Figura 4.55- Evolución de la presión de hinchamiento y el contenido de agua en ensayos de humedecimiento a volumen constante. (a)- Utilizando inyección de agua líquida (b)- Humedecimiento por transferencia de vapor.....	232
Figura 4.56- Ensayos de humedecimiento a volumen constante con transferencia líquida y de vapor. (a)- Evolución de la presión de hinchamiento con el grado de saturación. (b)- Trayectoria de tensiones.....	233
Figura 4.57- Dispositivo de ensayo utilizado para ensayos de humedecimiento a volumen constante con gradiente de inyección de agua de 2 m.....	234
Figura 4.58- Dispositivo de ensayo utilizado para ensayos de humedecimiento a volumen constante con gradiente de inyección de agua de 20 m.....	234
Figura 4.59- Resultados obtenidos durante ensayos de presión de hinchamiento utilizando diferentes gradientes de inyección de agua. (a)- Evolución de la presión de hinchamiento con el grado de saturación. (b)- Trayectoria de tensiones. (c)- Evolución en el tiempo de la presión vertical durante la parte inicial del ensayo.....	235



Figura 4.60- Evolución en el tiempo del grado de saturación para ensayos de humedecimiento a volumen constante con distintos gradientes de inyección de agua.....	236
Figura 5.1- Superficie de estado en el espacio ( $p', s, e$ ).....	255
Figura 5.2- Superficie de carga y colapso (LC) propuesta por el BBM en el plano ( $p', s$ ).....	255
Figura 5.3-. Superficies de fluencia correspondientes a dos suelos con características estructurales diferentes. (a)- Estructura abierta, (b)- Estructura cerrada.....	256
Figura 5.4- Arreglos estructurales de partículas de arcilla propuestos por H. van Olphen (1977).....	256
Figura 5.5- Correlaciones propuestas por Chen (1975) entre el potencial expansivo y el Índice Plástico de un material.....	257
Figura 5.6- Carta de clasificación del potencial expansivo propuesta por Seed <i>et al.</i> (1966).....	258
Figura 5.7- Distintos niveles estructurales identificados en una mezcla de pellets de bentonita.....	258
Figura 5.8- Representación de una mezcla de pellets de bentonita y la cinemática del proceso de hidratación.....	259
Figura 5.9- Evolución del proceso de hidratación a nivel local. Los pellets de bentonita intercambian agua con la macroestructura y se expanden.....	259
Figura 5.10- Evolución de la estructura interna del material. (a)- Efecto de la carga; (b)- Efecto del humedecimiento a carga constante; (c)-Efecto del humedecimiento a volumen constante.....	260
Figura 5.11- Dominio elástico y superficies de fluencia correspondientes al modelo constitutivo microestructural.....	261
Figura 5.12- Comportamiento previsto por el modelo micro para el caso de una trayectoria de humedecimiento volumen constante.....	261
Figura 5.13- Comportamiento previsto por el modelo micro para el caso de una trayectoria de humedecimiento a carga constante.....	262
Figura 5.14- Representación del dominio elástico y las superficies de fluencia propuestas por el modelo constitutivo macroestructural.....	262
Figura 5.15- Superficies de fluencia de carga y colapso para muestras con diferente nivel de empaquetamiento.....	263
Figura 5.16- Evolución de la deformación volumétrica en una trayectoria de humedecimiento a carga constante para una mezcla con una densidad baja o moderada.....	263
Figura 5.17- Evolución de la deformación volumétrica en una trayectoria de humedecimiento a carga constante para una mezcla con una densidad alta.....	264
Figura 5.18- Evolución de la deformación volumétrica en una trayectoria de humedecimiento a volumen constante prevista por el modelo macroestructural.....	264

Figura 5.19- Representación en el espacio ( $p'$ , $s$ , $J$ ) de las superficies de fluencia correspondientes a ambos niveles estructurales. (a)- Microestructural. (b)- Macroestructura.....	265
Figura 5.20- Representación de una mezcla de pellets y del medio idealizado a partir de elementos.....	265
Figura 5.21- Representación de la dinámica de flujo para una muestra real y otra idealizada.....	266
Figura 5.22- Representación del medio idealizado como suma de dos medios: medio global formado por elementos macro interconectados entre si y un medio local formado por elementos micro independientes entre si.....	267
Figura 5.23- Representación de un elemento idealizado y de las compatibilidades entre ambos niveles estructurales. Desplazamiento de la interfase micro-macro y del intercambio de agua.....	267
Figura 6.1- Hidratación de una muestra de pellets en condiciones edométricas. (a)- Medio real. (b)- Medio idealizado por dos elementos. (c)- Representación de la dinámica de flujo adoptada en el medio idealizado.....	281
Figura 6.2- Esquema de la hidratación de un pellet con condiciones de contorno impuestas desde la macroestructura, succión y tensión.....	282
Figura 6.3- Planteo del problema unidimensional para la microestructura. Hidratación desde la macroestructura. Discretización, relaciones de compatibilidad y condiciones de contorno.....	282
Figura 6.4- Sistema de coordenadas locales. Deformaciones volumétricas micro locales y deformaciones volumétricas micro globales.....	283
Figura 6.5- Representación de la dinámica de flujo. En cada elemento macro se asume la micro como una fuente o sumidero. (a) Conjunto de elementos macro que representan el medio. (b)- Planteo de los elementos micro, independientes entre si y como sumidero de la macro.....	283
Figura 6.6- Discretización del medio utilizando elemento idealizados de dimensión $DX$ .....	284
Figura 6.7- Elemento idealizado para el caso unidimensional. Relaciones de compatibilidad entre deformaciones, desplazamientos y coordenadas en el sistema de referencia global.....	285
Figura 6.8- Esquema de resolución iterativo.....	286
Figura 7.1- Trayectorias de humedecimiento a carga constante para la microestructura.....	300
Figura 7.2- Trayectorias de humedecimiento a carga constante para la determinación de parámetros de la macroestructura.....	300
Figura 7.3- Trayectorias de carga a succión constante para la determinación de parámetros de la macroestructura.....	301
Figura 7.4- Trayectorias de humedecimiento a carga constante representada en los planos macro y micro respectivamente.....	301

Figura 7.5- Ensayo de humedecimiento a carga constante de “inyección rápida”. (a)- Evolución de las succiones macro y micro. (b)- Evolución de la deformación vertical relativa.....	302
Figura 7.6. Evolución de la trayectoria de tensiones macro y micro durante el ensayo de humedecimiento a carga constante con “inyección rápida”.....	303
Figura 7.7. Ensayo de humedecimiento a carga constante de “inyección lenta”. (a)- Evolución de las succiones macro y micro. (b)- Evolución de la deformación vertical relativa.....	304
Figura 7.8. Evolución de la trayectoria de tensiones macro y micro durante el ensayo de humedecimiento a carga constante “lento”.....	305
Figura 7.9- Trayectorias de humedecimiento a volumen constante representada en los planos macro y micro respectivamente.....	305
Figura 7.10 Ensayo de humedecimiento a volumen constante (presión de hinchamiento) para $\rho_d=1.3 \text{ Mg/m}^3$ . (a)- Evolución de las succiones macro y micro. (b)- Evolución de la presión vertical según etapas.....	306
Figura 7.11. Evolución de las trayectorias de tensiones macro y micro durante el ensayo de presión de hinchamiento para $\rho_d=1.3 \text{ Mg/m}^3$ .....	307
Figura 7.12. Evolución de los índices de vacíos correspondientes a la macro y microestructura.....	307
Figura 7.13 Ensayo de humedecimiento a volumen constante (presión de hinchamiento) para $\rho_d=1.5 \text{ Mg/m}^3$ . (a)- Evolución de las succiones macro y micro. (b)- Evolución de la presión vertical según etapas.....	308
Figura 7.14. Evolución de las trayectorias de tensiones macro y micro durante el ensayo de presión de hinchamiento para $\rho_d=1.5 \text{ Mg/m}^3$ .....	309
Figura 8.1- Interpretación constitutiva de la evolución de las trayectorias de tensiones a lo largo del ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando inundación (transferencia líquida).....	330
Figura 8.2- Interpretación constitutiva de la evolución de las trayectorias de tensiones a lo largo del ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando transferencia de vapor.....	331
Figura 8.3- Evolución de la deformación vertical en el ensayo de humedecimiento a carga constante. Comparación entre el comportamiento observado y previsto por el modelo (acoplado). Ensayo realizado utilizando un humedecimiento por inundación con agua líquida.....	332
Figura 8.4- Evolución de las succiones macro y micro a lo largo del ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando inyección de agua líquida.....	332
Figura 8.5- Evolución de las trayectorias de tensiones a niveles macro y micro a lo largo del ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando un humedecimiento por inundación.....	333
Figura 8.6- Evolución de la deformación vertical en el ensayo de humedecimiento a carga constante. Comparación entre el comportamiento observado y previsto por el modelo (acoplado). Ensayo realizado utilizando un humedecimiento por transferencia de vapor.....	334

Figura 8.7- Evolución de las succiones macro y micro a lo largo del ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando transferencia de vapor.....	334
Figura 8.8- Evolución de las trayectorias de tensiones a niveles macro y micro a lo largo del ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando transferencia de vapor....	335
Figura 8.9- Evolución de la presión vertical en ensayos de presión de hinchamiento VC15-1 y VC15-2.....	336
Figura 8.10- Comparación entre comportamiento observado y previsto por el modelo para el caso del ensayo de presión de hinchamiento V15-1.....	336
Figura 8.11- Evolución de las succiones macro y micro a lo largo del ensayo de presión de hinchamiento VC15-1. Se indican las diferentes etapas en correspondencia con la evolución de la presión vertical de hinchamiento.....	337
Figura 8.12- Evolución de las trayectorias de tensiones macro y micro a lo largo de las diferentes etapas del ensayo VC15-1.....	338
Figura 8.13- Evolución de la presión de hinchamiento y del grado de saturación de la muestra para los ensayos de humedecimiento a volumen constante utilizando diferentes presiones de inyección de agua. Ensayos VC13-W-2 y VC13-W-20.....	339
Figura 8.14- Evolución de la presión de hinchamiento con el grado de saturación de la muestra para los ensayos de humedecimiento a volumen constante. Ensayos realizados utilizando diferentes presiones de inyección de agua.....	340
Figura 8.15- Evolución de la presión vertical de hinchamiento. Comparación del comportamiento observado y previsto por el modelo a lo largo del ensayo de humedecimiento a volumen constante realizado utilizando una presión de inyección de 20 kPa. Ensayo VC13-W-2.....	340
Figura 8.16- Evolución de las succiones macro y micro a lo largo del ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando una presión de inyección de 20 kPa. Ensayo VC13-W-2.....	341
Figura 8.17- Trayectoria de tensiones macro y micro para el ensayo de presión de hinchamiento con inyección de agua a 20 kPa.....	342
Figura 8.18- Comparación entre comportamiento observado y previsto por el modelo para el caso del ensayo de humedecimiento a volumen constante utilizando una presión de inyección de 200 kPa.....	343
Figura 8.19- Evolución de las diferentes variables a lo largo del ensayo. Comparación entre el comportamiento observado y el previsto por el modelo.....	344
Figura 8.20- Comparación del comportamiento observado y previsto de la evolución de la permeabilidad con el grado de saturación de la muestra.....	345
Figura 8.21- Cambio volumétrico inducido en la macroestructura por expansión de la microestructura. (a)- Expansión isotrópica de la macroestructura. (b) Invasión de la macroestructura.....	346
Figura 8.22- Funciones de interacción micro-macro. Definen el mecanismo de deformación volumétrica que actúa en cada caso.....	347

Figura 8.23- Resultados obtenidos en la modelación del ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando un humedecimiento por vapor (ensayo CC13-300-V). Comparación de la deformación vertical en el caso de utilizar un modelo con acoplamiento constitutivo.....	348
Figura 8.24- Resultados obtenidos en la modelación del ensayo de humedecimiento a carga constante utilizando un humedecimiento por inundación (ensayo CC13-300-W). Comparación de la deformación vertical en el caso de utilizar un modelo con acoplamiento constitutivo.....	348
Figura 9.1- Esquema general con las características del ensayo de columna de infiltración.....	357
Figura 9.2- Vista general del la columna de infiltración.....	358
Figura 9.3- Secuencia inicial del montaje del dispositivo de ensayo.....	359
Figura 9.4- secuencia de montaje de sensores de presión lateral.....	360
Figura 9.5- Detalle del sistema de ajuste utilizado en los sensores de presión lateral..	360
Figura 9.6- Detalle del emplazamiento de la célula de presión vertical, tubo de inyección a agua y sistema de ajuste y cierre.....	361
Figura 9.7- Calibración de la columna de infiltración obtenida previo a la realización de un ensayo.....	362
Figura 9.8- Secuencia de preparación de la muestra y compactación del material.....	362
Figura 9.9- Evolución de la tensión horizontal, el coeficiente de Poisson y $K_0$ en función de la tensión vertical de compactación para cada uno de los sensores durante la compactación de la capa 3 del TEST 2.....	363
Figura 9.10- Evolución de la tensión desviadora, el coeficiente de Poisson y $K_0$ en función de la tensión media neta durante la compactación en los distintos sensores, capa 3 del TEST 2.....	364
Figura 9.11- Dispositivo de ensayo. Columna de infiltración y sistemas de adquisición de datos.....	365
Figura 9.12- Evolución de la presión de agua, volumen y caudal de agua inyectados durante la primera fase de los ensayos. (a)- Ensayo con caudal controlado. (b)- Ensayo con presión controlada.....	365
Figura 9.13 – Evolución del volumen de agua inyectado y el flujo durante los ensayos de columna de infiltración.....	366
Figura 9.14- Evolución de las presiones de hinchamiento y el volumen de agua inyectado durante el ensayo de columna de infiltración TEST 1.....	367
Figura 9.15 – Evolución de la presión de hinchamiento durante los ensayos de columna de infiltración TEST 1 y TEST 2.....	367
Figura 9.16- Evolución de las presiones de hinchamiento y el volumen de agua inyectado durante el ensayo de columna de infiltración TEST 2.....	368
Figura 9.17- Evolución de la tensión media y la tensión desviadora correspondientes al TEST 2 para cada uno de los sensores de tensión lateral.....	369
Figura 9.18- Trayectorias de tensiones (p,q) obtenidas durante el ensayo de columna de infiltración TEST 2.....	370

- Figura 9.19- Trayectorias de tensiones ( $p, q$ ) obtenidas en ensayos de humedecimiento a volumen constante realizados en un edómetro con control de la tensión lateral.....371
- Figura 9.20- Trayectorias de tensiones ( $p', q$ ) obtenidas en el ensayo VC13-2 y el TEST 2 (sensor 2) de la columna de infiltración.....371
- Figura 9.21- Representación de la etapa inicial de inyección de agua. (a) Ubicación del agua inyectada durante la etapa inicial del ensayo. (b) Efecto producido por la expansión de la zona inundada.....372
- Figura 9.22 - Distribución del contenido de agua, grado de saturación y densidad seca del la muestra de pellets al final del ensayo de columna de infiltración TEST 1.....373
- Figura 9.23- Aspecto de la muestra de pellets. (1) Luego de la compactación. (2) Sección al centro de la muestra al final del ensayo TEST 1. (3) Material en contacto con el inyector de agua (4) Material al centro de la muestra.....374
- Figura 9.24- Aspecto de la muestra de pellets en la zona más lejana al inyector. Se identifican los grandes vacíos entre pellets que aún no se han “invadido” totalmente.374