

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Comportamiento de barreras de limo compactado bajo condición de infiltración

por

Gonzalo M. Aiassa

Tesis presentada como requisito para acceder
al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil
Mención en Estructuras y Geotecnia

Córdoba, Septiembre 2006

**Comportamiento de barreras de limo compactado
bajo condición de infiltración**

AUTOR: Gonzalo M. Aiassa

DIRECTOR: Dr. Marcelo E. Zeballos

Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Maestría en Ciencias de la Ingeniería Civil
Mención en Estructuras y Geotecnia

Esta tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, para cumplimentar los requerimientos de obtención del grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Mención en Estructuras y Geotecnia.

Córdoba, Argentina
4 de Septiembre de 2006

Agradecimientos

Muchas son las personas que me han apoyado para que este trabajo pudiera concluirse. Sin el apoyo moral, intelectual, afectivo y económico recibido hubiera resultado imposible cumplir con este objetivo. A todos los involucrados, deseo expresarles mi sincero agradecimiento.

En primer lugar quiero agradecerle a mi Director, Marcelo Zeballos. Gracias por los consejos, tiempo y paciencia que siempre estuvo dispuesto a brindarme. Sin duda, sus enseñanzas y guía han sido fundamental para el desarrollo de esta tesis. A Roberto Terzariol por darme empuje en este desafío y permitirme compartir sus experiencias y amistad. También quiero agradecer a Emilio Redolfi por su apoyo y consejos brindados en el comienzo de este desafío y en los momentos difíciles. Marcelo, Roberto y Emilio, gracias por la confianza.

Expreso mi agradecimiento a todo el plantel docente de esta Maestría. En particular, a Ricardo Rocca por su orientación en los aspectos administrativos y las fuentes bibliográficas proporcionadas. A Tomás Prato, quien fue mi primer docente de cursos, y me brindó su comprensión, respaldo y me dio fuerzas para seguir adelante en esto que parecía ser un árido camino.

Agradezco a la Universidad Tecnológica Nacional por brindarme el apoyo económico, a través de la beca de posgrado. En particular, a la Facultad Regional Córdoba, que me proporcionó un cálido y armónico ámbito de trabajo. Gracias al Departamento de Ingeniería Civil y a todo el cuerpo docente, quienes me brindaron un gran apoyo. En particular, siempre recibí sanos consejos, apoyo y orientaciones por parte de dos investigadores, a quienes quiero destacar. Muchas gracias Luis Canali y Jorge Jazni.

A Pedro Arrúa por acompañarme en este camino, compartir los buenos momentos, y aguantarme los malos humores. Gracias por la transparencia y

amistad, que han permitido desarrollar un entorno de trabajo agradable, perdurable y potencial.

Finalmente quiero agradecer a mi familia. A mis padres, gracias por haberme brindado todo. A mi mamá por su ternura y eficiencia, y a mi papá por enseñarme el camino en la vida y permitirme transitarlo. A mi hermanita Ivana, por la alegría que le da al hogar. En particular, a María Sol, mi novia y futura esposa. Sol, gracias por tu amor, paciencia, tolerancia, soporte y enseñarme todos los días a disfrutar la vida.

Gonzalo M. Aiassa

Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Planteo del problema.....	1
1.2 Objetivos y alcances de los estudios realizados.....	3
1.3 Organización de los trabajos realizados	4
Capítulo 2: Infiltración y modelos de flujo en suelos.....	6
2.1 Introducción	6
2.2 Conceptos de movilización de fluidos en medios porosos	6
2.2.1 Energía potencial.....	6
2.2.2 Filtraciones en medios saturados	8
2.2.3 Filtraciones en medios no saturados	10
2.3 Curva característica suelo agua	13
2.3.1 Definición y análisis de parámetros	15
2.3.2 Ecuaciones para la curva característica	25
2.4 Funciones de permeabilidad	30
2.4.1 Ecuaciones empíricas	32
2.4.2 Modelos macroscópicos	33
2.4.3 Modelos estadísticos	33
2.5 Formulación de ecuaciones de flujo en medios porosos.....	34
2.5.1 Flujo en estado estacionario saturado.....	35
2.5.2 Flujo no estacionario saturado	37
2.5.3 Flujo transitorio no saturado.....	38
2.6 Modelos clásicos de infiltración.....	39
2.6.1 Modelos empíricos	40
2.6.2 Modelos de Green-Ampt.....	42
2.6.3 Soluciones simplificadas de la ecuación de Richards.....	45
2.7 Soluciones numéricas y analíticas a problemas de infiltración	46
2.7.1 Modelos unidimensionales no estacionarios.....	47
2.7.2 Modelos unidimensionales estacionarios.....	48
2.8 Sumario	54
Capítulo 3: Comportamiento de suelos compactados	56
3.1 Introducción	56
3.2 Conceptos generales de la compactación de suelos	57

3.2.1 Fases del suelo.....	58
3.2.2 Interacción entre fases	60
3.2.3 Formación de estructura en suelos finos.....	64
3.2.4 Teorías de compactación	69
3.2.5 Ensayos de laboratorio	77
3.3 Factores que afectan la resistencia	81
3.3.1 Contenido de humedad y método de compactación.....	81
3.3.2 Energía de compactación.....	93
3.3.3 Historia de tensiones y ciclos de carga.....	95
3.3.4 Duración y velocidad de aplicación de carga	97
3.3.5 Tixotropía	99
3.4 Factores que afectan la permeabilidad	104
3.4.1 Relación de vacíos y composición de partículas.....	105
3.4.2 Humedad de compactación y estructura.....	108
3.4.3 Energía y método de compactación	111
3.4.4 Grado de saturación	115
3.4.5 Tixotropía	116
3.4.6 Fisuración.....	117
3.4.7 Tipo de fluido permeante	123
3.4.8 Mezclado de muestras y terrones.....	124
3.4.9 Permeabilidad en <i>loess</i> natural y compactado.....	128
3.5 Sumario	130

Capítulo 4: Geotecnia ambiental en depósitos de residuos..... 133

4.1 Introducción	133
4.2 Evolución histórica	134
4.3 Sistemas de contención de residuos	135
4.4 Sistemas de barreras.....	139
4.4.1 Barreras de fondo	139
4.4.2 Barreras de cubierta	142
4.4.3 Regulaciones para el diseño de barreras	145
4.5 Comportamiento de barreras de suelo compactado	150
4.5.1 Transporte de contaminantes	150
4.5.2 Propiedades deseables en barreras de suelo compactado	152
4.5.3 Condiciones de compactación	155
4.5.4 Espesor mínimo de barrera.....	159
4.5.5 Control de permeabilidad	161
4.6 Sumario	171

Capítulo 5: Comportamiento de los depósitos de <i>loess</i>	172
5.1 Introducción	172
5.2 Distribución y origen en Argentina	173
5.3 Composición y estructura.....	178
5.4 Propiedades de identificación	183
5.5 Comportamiento tenso-deformacional y colapso.....	184
5.6 Métodos para el análisis de cambio volumétrico.....	194
5.6.1 Colapso relativo.....	194
5.6.2 Modelo elastoplástico.....	198
5.7 Sumario	205
Capítulo 6: Estudio experimental.....	206
6.1 Introducción	206
6.2 Materiales y métodos.....	206
6.2.1 Suelo.....	206
6.2.2 Ensayos de identificación.....	207
6.2.3 Curva característica y función de permeabilidad.....	208
6.2.4 Ensayos de compresión confinada.....	209
6.2.5 Ensayos de infiltración	211
6.3 Resultados y análisis	213
6.3.1 Caracterización del suelo	213
6.3.2 Relaciones entre succión, humedad y permeabilidad	215
6.3.3 Relación tensión-deformación	224
6.3.4 Infiltración en suelo natural y compactado.....	231
6.4 Sumario	239
Capítulo 7: Modelación numérica.....	243
7.1 Introducción	243
7.2 Modelos numéricos	244
7.2.1 Infiltración.....	244
7.2.2 Modelo tenso-deformacional	245
7.3 Definición de parámetros.....	247
7.3.1 Modelos de infiltración	247
7.3.2 Modelo de colapso relativo	256
7.4 Modelo de asentamiento propuesto.....	262
7.4.1 Consideraciones generales.....	262
7.4.2 Desarrollo del modelo	263
7.5 Mecanismos de transporte	274

7.6 Caso de estudio	281
7.6.1 Generalidades	281
7.6.2 Modelo acoplado.....	281
7.6.3 Descripción del problema.....	282
7.6.4 Resultados y análisis	285
7.6.5 Comparación con regulaciones.....	297
7.7 Sumario	299
Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones.....	301
8.1 Sumario y conclusiones.....	301
8.2 Recomendaciones para estudios futuros.....	307
Referencias	309
Apéndice A: Códigos de modelos de infiltración	A-1
Apéndice B: Códigos de modelos de asentamiento.....	B-1
Apéndice C: Códigos de análisis de barreras.....	C-1
Apéndice D: Planillas de resultados experimentales	D-1
Apéndice E: Publicaciones generadas a partir de este trabajo	E-1

Comportamiento de barreras de limo compactado bajo condición de infiltración

The behavior of compacted silt liners under infiltration conditions

Resumen

En los depósitos de residuos, frecuentemente, se emplean barreras de suelo compactado para limitar la fuga de contaminantes hacia el suelo y el agua subterránea. La definición de criterios de diseño para estas barreras demanda la necesidad de contar con herramientas numéricas que permitan predecir el comportamiento del sistema.

En esta tesis, se presenta un modelo numérico acoplado de infiltración- asentamiento. Este modelo ha sido calibrado a partir de resultados experimentales. El modelo ha sido aplicado en el análisis de diferentes escenarios, con el fin de evaluar el comportamiento de barreras de limos compactados instaladas en *loess*. Los resultados obtenidos han sido empleados para formular recomendaciones de diseño y construcción de barreras.

Abstract

Compacted soil liners are frequently used in landfill liner systems to limit the loss of contaminant towards soil and groundwater. Numerical tools for predicting the behavior of the system are necessary to establish liners design criteria.

This thesis presents a coupled infiltration-settlement numerical model, which has been calibrated from experimental results. The model has been applied to evaluate the behavior of compacted silt liners present in loess, through different types of analysis. The results obtained have been employed to formulate certain recommendations for the design and construction of liners.