



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN DE RELAVES
ESPESADOS TTD DEPOSITADOS DIRECTAMENTE SOBRE SUELOS NATURALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DANIELA ANDREA RIVERA GALLARDO

**PROFESOR GUÍA:
LUIS PAREDES ACEVEDO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PAULO HERRERA RICCI
PEDRO ACEVEDO MOYANO**

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por SNC-Lavalin.

**SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE, 2012**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: DANIELA RIVERA GALLARDO
FECHA: 12/12/2012
PROF. GUÍA: SR. LUIS PAREDES

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL POTENCIAL DE INFILTRACIÓN DE RELAVES ESPESADOS DEPOSITADOS DIRECTAMENTE SOBRE SUELOS NATURALES

Los depósitos de relaves espesados, o TTD según sus siglas en inglés (*Thickened Tailings Disposal*), son aquellos en los cuales el relave descargado ha sido sometido a un proceso de espesamiento, incrementando las concentraciones de sólido en peso en comparación al relave convencional. Esta tecnología está siendo cada vez más utilizada en los últimos años debido principalmente a que permite una utilización más eficiente del agua que los relaves convencionales. Desde la perspectiva ambiental, uno de los mayores problemas provocados por la depositación de relaves es la contaminación de las napas subterráneas debido a la infiltración de agua desde los depósitos. El uso de TTD, en teoría, reduciría en forma considerable este impacto, debido a que contienen un bajo contenido de agua, además de material altamente impermeable. Si bien existen estudios de laboratorio, terreno y modelación que muestran que la infiltración mediante este método es baja, aún es necesario avanzar en estudios que permitan entender de mejor manera este fenómeno. La presente investigación está enfocada en el análisis de los parámetros geotécnicos que controlan la infiltración de agua desde los relaves espesados hacia el subsuelo, considerando las características tanto de los relaves como de los suelos subyacentes a los depósitos.

En esta investigación se implementó un ensayo de laboratorio que permite medir la humedad en el suelo subyacente al depositar sobre él una capa de relave. El aparato utilizado consistió en un cilindro de 40 a 50 cm de alto y 9,6 cm de diámetro dentro del cual se colocó una capa de suelo natural de 30 a 40 cm de espesor y sobre él la capa de relaves de 5 cm de espesor con las características típicas de depositación. La humedad fue medida en profundidad a través de sensores conectados a un datalogger. El programa de ensayos desarrollado consideró tres relaves provenientes de diferentes proyectos mineros y dos suelos naturales con distintas características geotécnicas, que provienen de sitios en donde se emplazarán depósitos de relaves.

Los resultados de los ensayos permiten concluir que la infiltración en el suelo es producida en mayor medida inmediatamente después de la depositación del relave y la cantidad de agua infiltrada depende, principalmente, de las propiedades intrínsecas del suelo de fundación y no de las características del relave. Por otra parte, la infiltración al suelo de fundación no se ve afectada de manera importante por efecto de la radiación. En el relave, en cambio, la humedad final es controlada principalmente por este efecto. En los ensayos realizados, la infiltración producida en los suelos de fundación, los cuales no presentaban humedad al comienzo de los ensayos, no superó humedades finales de 7% y profundidades superiores a 25 cm al final del ensayo.

*Con amor a Camila, Lorena y Roberto,
por estar conmigo y apoyarme siempre.*

Índice de Contenidos

1	OBJETIVOS Y ALCANCES.....	1
1.1	Generalidades Relativas a los Relaves Espesados (TTD).....	1
1.2	Objetivos de la investigación	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Metodología	2
1.4	Organización de la investigación	3
2	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Introducción	4
2.2	Ensayos de laboratorio de caracterización de relaves espesados propuestos por Robinsky	5
2.2.1	Caracterización de relaves espesados	6
2.2.2	Ensayo de Permeabilidad	7
2.3	Antecedentes sobre Infiltración	8
2.3.1	Ensayos de laboratorio	9
2.3.2	Ensayos de terreno	16
2.3.3	Modelos numéricos	16
3	PROGRAMA DE ENSAYOS	18
3.1	Introducción	18
3.2	Suelos utilizados	18
3.2.1	Muestras de relaves.....	18
3.2.2	Muestras de suelos de fundación	19
3.3	Ensayos	19
3.3.1	Caracterización geotécnica de suelos	20
3.3.2	Curva de retención de agua en suelo	20
3.3.3	Ensayos de infiltración del agua de relaves sobre suelos naturales	21
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1	Introducción	28

4.2	Caracterización geotécnica de suelos naturales	28
4.3	Caracterización geotécnica de relaves.....	30
4.4	Ensayos de infiltración	32
4.4.1	Resultados generales acerca del comportamiento post deposición de los suelos de fundación y relave.....	32
4.4.2	Influencia de las características del relave	37
4.4.3	Efecto de cambio de suelo.....	40
4.4.4	Efecto de la radiación	40
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
5.1	Conclusiones	42
5.2	Recomendaciones para futuras investigaciones	43
6	BIBLIOGRAFÍA.....	44
7	ANEXOS.....	46

Anexos

ANEXO A: Curvas de humedad versus tiempo

ANEXO B: Perfiles de humedad iniciales y finales

Listado de Tablas

Tabla 3.1: Muestras de Relaves.

Tabla 3.2: Ensayos de caracterización de suelos de fundación.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de sensor de humedad EC-5 Decagon.

Tabla 4.1: Propiedades geotécnicas de Suelos de Fundación SF1 y SF2.

Tabla 4.2: Resumen de Parámetros Geotécnicos.

Tabla 4.3. Programa de Ensayos de infiltración.

Tabla 4.4: Resumen de las humedades máximas, momento en que la alcanza y humedad final de la primera capa para cada uno de los ensayos.

Listado de Figuras

Figura 2.1: Comparación entre depósitos de relaves convencionales y espesados (Ref. Depósitos de Relaves Espesados y en Pasta, VST Ingenieros, SUSTENTARE, Santiago, Julio 2007).

Figura 2.2: Ejemplo de ensayo de permeabilidad en celda de consolidación (Información de proyecto facilitado por SNC-Lavalin).

Figura 2.3: Ensayo de columna de drenaje más evaporación de 40 cm de espesor. Estrato de drenaje y sistema de colección en la parte inferior con relaves y tensiómetros en la parte superior (Junqueira et al, 2011).

Figura 2.4: Evolución de la pérdida de agua por evaporación (E) y drenaje hacia el subsuelo (D) para las columnas de 20 cm y 40 cm de espesor (Junqueira, 2011).

Figura 2.5: Pérdida de agua promedio diaria por evaporación (E) y drenaje hacia el subsuelo (D) para las columnas de 20 cm y 40 cm de espesor (Junqueira, 2011).

Figura 2.6: Evolución de la pérdida de agua debido a evaporación (EV) y drenaje hacia el subsuelo (DR) para las columnas de evaporación más drenaje (Junqueira, 2011).

Figura 2.7: Pérdida total de agua debido a evaporación y drenaje hacia el subsuelo para las columnas de evaporación más drenaje.

Figura 3.1: Sensor de humedad EC-5.

Figura 3.2: Datalogger CR1000.

Figura 3.3: Montaje del ensayo que muestra los sensores ubicados en la columna de suelo, los cuales se encuentran conectados al sistema de adquisición de datos.

Figura 3.4: Instalación de Sensores.

Figura 3.5: Descarga de relave espesado.

Figura 3.6: Comienzo de la Infiltración.

Figura 3.7: Aplicación de calor para simular efectos de radiación de terreno.

Figura 4.1: Granulometrías de Suelos de Fundación SF1 y SF2.

Figura 4.2: Curvas de humedad de Suelos de Fundación SF1 y SF2.

Figura 4.3: Granulometrías de Relaves R1, R2 y R3.

Figura 4.4: Curvas de retención de humedad de Relaves R1, R2 y R3.

Figura 4.5: Curvas humedad vs tiempo que reflejan el aumento inmediato de humedad de la capa más superficial del suelo.

Figura 4.6: Perfiles de humedad al inicio, a 1 hora y a 12 días del Ensayo 3. Reflejan el aumento y luego disminución de humedad para la capa más superficial del suelo de fundación.

Figura 4.7: Curvas humedad vs tiempo de Ensayo 3.

Figura 4.8: Efecto de la lámpara en la humedad. El periodo entre las líneas negras corresponde al lapso cuando la lámpara está encendida.

Figura 4.9: Perfiles de humedad al inicio y después de 14 días para el Suelo de Fundación 1 con los relaves R1, R2 y R3.

Figura 4.10: Perfiles de humedad al inicio y después de 12 días para el Suelo de Fundación 2 con los relaves R1, R2 y R3.

Figura 4.11: Perfiles de humedad al inicio y después de 14 días para comparar ensayos con y sin lámpara de calor.

1 OBJETIVOS Y ALCANCES

1.1 Generalidades Relativas a los Relaves Espesados (TTD)

Los depósitos de relaves espesados o TTD, según sus siglas en inglés (*Thickened Tailings Disposal*), son aquellos depósitos de forma cónica, en los cuales el relave descargado ha sido sometido previamente a un proceso de espesamiento, lo que al incrementar las concentraciones de sólidos en peso en comparación al relave convencional, puede ser considerado como autosoportante, con mayor estabilidad estática y sísmica que los depósitos convencionales.

Esta tecnología está siendo cada vez más utilizada en los últimos años debido principalmente, a que permite una utilización del agua más eficiente que los relaves convencionales. Además, los depósitos generados a través de esta tecnología son más estables.

Desde la perspectiva ambiental, uno de los mayores problemas provocados por la depositación de relaves es el riesgo de la contaminación de las napas subterráneas debido a la infiltración de aguas desde los tranques donde éstos se depositan. El uso de TTD reduciría este impacto, debido a que contienen un bajo contenido de agua, además de material altamente impermeable. De este modo, en teoría, se reducirían en forma considerable las infiltraciones hacia el subsuelo.

Si bien existen estudios de laboratorio, terreno y modelación que muestran que la infiltración mediante este método es baja, aún es necesario avanzar en estudios que permitan comprender de mejor manera este fenómeno.

La presente investigación analiza empíricamente los parámetros geotécnicos que controlan la infiltración de agua desde los relaves espesados hacia el subsuelo de la ladera portante, considerando las características tanto de los relaves como de los suelos subyacentes a los depósitos. Para esto, se implementó un ensayo de laboratorio que permite medir la humedad en el suelo subyacente al depositar sobre él una capa de relave.

El programa de ensayos desarrollado consideró tres relaves provenientes de diferentes proyectos y dos suelos naturales con distintas características geotécnicas que provienen de sitios donde se emplazarán depósitos de relaves.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal de la presente investigación es analizar las características geotécnicas que controlan la infiltración de agua contenida en los relaves espesados hacia el subsuelo. Para esto fueron consideradas tanto las características de los relaves como las de los suelos subyacentes a los depósitos.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- i. Implementar un ensayo que permita determinar los cambios de humedad inducidos en el suelo de fundación luego de la depositación de una capa de relave espesado;
- ii. Determinar a nivel empírico, las variables que rigen el potencial de infiltración en el suelo natural debido a la depositación de relave espesado; y
- iii. Determinar si existen características del relave espesado que pudieran disminuir las infiltraciones del agua de proceso en el suelo de depositación.

1.3 Metodología

Con el objeto de simular la depositación de relaves espesados en terreno, se implementó un ensayo de laboratorio que permite medir la variación de la humedad del subsuelo cuando sobre él se ha depositado una capa de relave espesado. Para esto se construyeron moldes cilíndricos de acrílico de 40 y 50 cm de altura, y 10 cm de diámetro aproximadamente. En estos cilindros se colocó una capa de material compactado simulando el suelo de fundación de los depósitos. Sobre este material se vertió una capa de relave espesado controlando su concentración de sólidos. La humedad fue medida a distintas profundidades mediante un sistema de adquisición de datos de registro continuo conectado a sensores de humedad de tipo capacitivo que miden la humedad mediante la constante dieléctrica del suelo.

Para simular el efecto de la evaporación producida en terreno se utilizó en los ensayos una lámpara de calor infrarroja. Para determinar la evaporación producida debido al uso del calor y comparar estas con los valores de terreno, se utilizaron evaporímetros de superficie libre y de suelos saturados.

El ensayo se realiza a distintas combinaciones de suelos y relaves, y se analizan tanto el efecto de las características del relave que afectan la infiltración para un mismo suelo de fundación, como el efecto de las propiedades de los suelos de fundación para igual relave depositado. También se estudia el efecto de las condiciones ambientales de evaporación.

También se analizarán las curvas de retención para evaluar como la infiltración es afectada por la capacidad de retención de agua de los suelos y relaves.

1.4 Organización de la investigación

En el Capítulo 2 se entrega un marco teórico en el cual se presenta el estado del arte de los aspectos clave de esta investigación, focalizados en estudios previos acerca del comportamiento de los depósitos de relaves espesados post-depositación, particularmente en términos de infiltración desde el relave hacia el subsuelo. El Capítulo 3 corresponde al programa de ensayos, describiendo dentro de éste los ensayos realizados y la metodología utilizada en cada uno de ellos, poniendo énfasis en el ensayo de infiltración implementado para la presente investigación. El Capítulo 4 de Resultados y Discusión, presenta en primer lugar las características geotécnicas de los materiales utilizados; luego se analizan los resultados de los ensayos de infiltración realizados en base a las características de los materiales utilizados. Finalmente, las principales conclusiones del trabajo desarrollado se resumen en el Capítulo 5, junto a recomendaciones para estudios futuros. El Capítulo 6 corresponde a la bibliografía y el Capítulo 7 a los anexos que incluyen los resultados de todos los ensayos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

Este capítulo trata sobre el concepto básico y descripción del sistema TTD (Depósitos de Relaves Espesados) y la teoría desarrollada acerca de la infiltración que se produce en los suelos naturales proveniente de los líquidos de este tipo de depósitos.

Los principios básicos establecidos por el sistema TTD son espesar los relaves hasta obtener una mezcla semilíquida de alta consistencia y descargarlos para obtener la máxima superficie de evaporación. El propósito es simplemente disponer de una gran cantidad de roca finamente molida y agua procesada al menor costo (Robinsky, 1999).

El comportamiento de la masa espesada es más como el de un semisólido que el de un fluido. Dentro de esta masa no se produce segregación, a diferencia de lo que ocurre en relaves convencionales, generándose un material homogéneo en toda la masa de relaves depositada. De este modo, debido a que la fracción fina de los relaves permanece atrapada y dispersa homogéneamente dentro de la masa de relaves, no se forma una laguna de sedimentación de finos, disminuyendo el gradiente hidráulico en comparación a los relaves convencionales.

En la Figura 2.1 se presenta una imagen comparativa entre los depósitos de relaves convencionales y espesados. Se observa que en los tranques convencionales el nivel freático se ubica en la parte superior del depósito debido a la existencia de la laguna de aguas claras. En los depósitos de relaves espesados la depositación se realiza en capas de pequeño espesor, de esta forma se induce la evaporación luego de la colocación de cada una de las capas, lo que permite mantener el nivel freático localizado en la parte inferior del tranque.

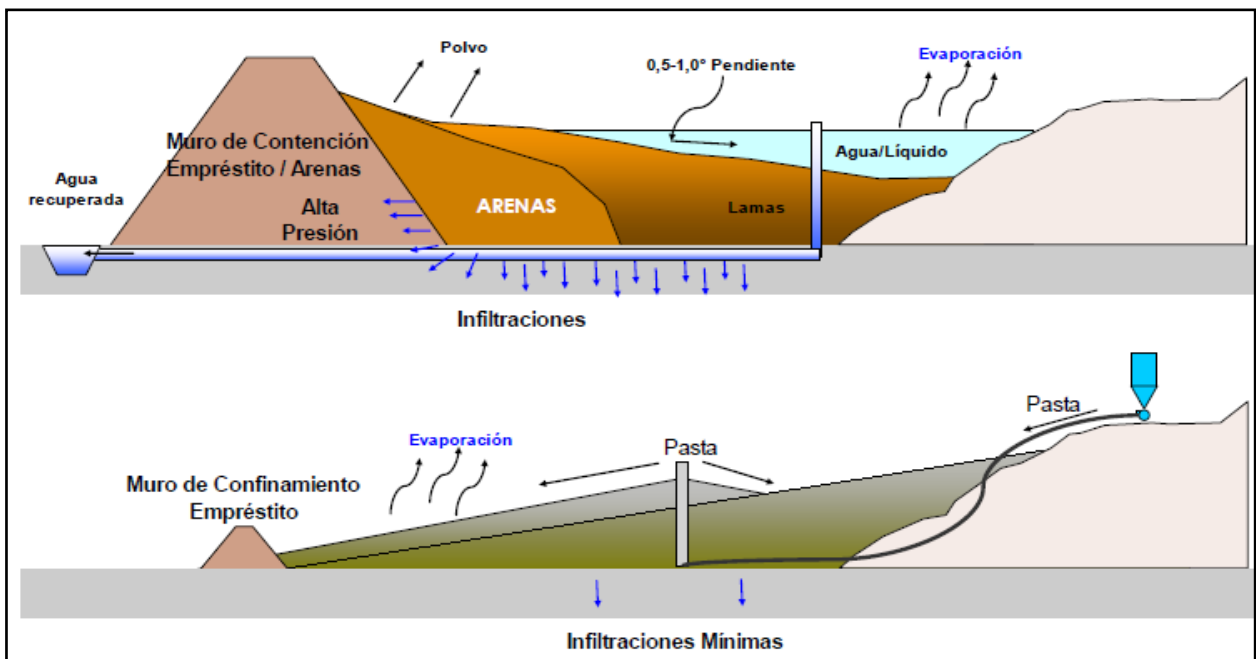


Figura 2.1: Comparación entre depósitos de relaves convencionales y espesados (Ref. Depósitos de Relaves Espesados y en Pasta, VST Ingenieros, SUSTENTARE, Santiago, Julio 2007).

El espesamiento también produce un aumento en la resistencia al corte de los relaves, permitiendo que los relaves se depositen con una pendiente más pronunciada reduciendo o incluso eliminando la necesidad de una presa de gran altura para contener los relaves.

2.2 Ensayos de laboratorio de caracterización de relaves espesados propuestos por Robinsky

Los siguientes procedimientos y ensayos de laboratorio son recomendaciones de Robinsky basadas en su experiencia. Han sido incluidos en esta investigación ya que constituyen ejemplos de cómo determinar propiedades de los relaves que sean útiles para predecir su comportamiento en terreno.

Debido a que los relaves espesados se encuentran en un estado semilíquido o semiplástico, o uno con una consistencia entre semiplástica y sólida, a diferencia de lo que ocurre comúnmente en otros suelos, solo algunos de los ensayos convencionales pueden ser aplicados a relaves en pasta, haciéndose necesario desarrollar nuevos ensayos y procedimientos para determinar las características de los relaves espesados.

2.2.1 Caracterización de relaves espesados

Los primeros ensayos a realizar en la caracterización de los relaves son los de clasificación, que incluyen los ensayos de granulometría e hidrometría hasta tamaño de partículas 0,002 mm, gravedad específica de los sólidos y límites líquido y plástico para las pastas más cohesivas.

2.2.1.1 Análisis granulométrico

El objetivo de este ensayo es determinar la distribución granulométrica del relave. Debido a que Robinsky ha encontrado que la cantidad de material entre 0,002 mm y 0,02 mm tiene la mayor influencia en el comportamiento del flujo en los relaves en pasta y en su pendiente de depositación, así como en el límite de contracción y, por lo tanto, en la densidad que puede ser obtenida debido a la desecación. La granulometría debe ser efectuada hasta tamaño de partícula 0,002 mm.

Esta se obtiene a partir del tamizado de los relaves por mallas estandarizadas según norma ASTM, hasta un tamaño de 25 μm (malla #500). La granulometría de los tamaños inferiores a este valor se obtienen vía Hidrometría, que es un proceso basado en la sedimentación de las partículas en una probeta estandarizada y en condiciones controladas (ASTM-D.422-63).

2.2.1.2 Límites de consistencia, peso específico y clasificación USCS

En la determinación de estas propiedades se utilizan los ensayos estándar sin procedimientos especiales recomendados.

2.2.1.3 Límite de contracción

El límite de contracción es la humedad máxima de un suelo bajo la cual variaciones del contenido de humedad por secamiento del sedimento de grano fino no causan variaciones de volumen. Este valor se representa como un porcentaje y también se puede indicar como una concentración de sólidos equivalente con respecto al peso seco de los sólidos, y relacionarla con la densidad que puede lograr un relave depositado.

El límite de contracción es relevante ya que el área de los depósitos y los puntos de descarga de relaves se suelen diseñar en un arreglo tal que permita que los relaves alcancen el límite de contracción a medida que se construye el depósito, para

condiciones climáticas suficientemente secas. Ante esto, Robinsky (Robinsky, 1999) resalta que las muestras para determinar el límite de contracción deben ser lo suficientemente grandes para proporcionar una evaluación precisa, considerando además la alta variación de volumen que experimenta este tipo de materiales. Robinsky ha obtenido exitosamente valores razonables usando un cilindro acrílico de 75 mm de diámetro interior y 40 mm de alto. Los relaves, al porcentaje de sólidos esperado en la futura planta para la descarga de TTD son vertidos en al menos dos contenedores ligeramente aceitados y dejados secar extremadamente lento. Esto puede tomar hasta dos semanas. Durante el proceso de secado se debe registrar la masa de la muestra hasta que ésta se estabilice. Una tasa de secado lenta es requerida para prevenir que la muestra se agriete. Cuando las muestras están suficientemente secas pueden ser extraídas de los contenedores y manipuladas con mayor facilidad. Para asegurar que las muestras estén secas éstas deben ponerse a un horno a 40 o 50 °C por 5 o 6 horas. Si las superficies superior e inferior no son planas, las muestras pueden ser suavizadas en una hoja fina de lija. Finalmente las muestras son medidas para obtener su volumen. Sabiendo el volumen, la masa y la gravedad específica de los sólidos, pueden ser calculados el límite de contracción y las densidades saturada y seca.

2.2.2 Ensayo de Permeabilidad

En el proceso de consolidación de los relaves producido tanto por la contracción por secamiento natural como por peso propio, las partículas se acomodan de manera óptima y disminuye la permeabilidad del material comparativamente a si éste está depositado sin consolidación. Debido a que los relaves en el momento de descarga se presentan en estado líquido, el cambio en volumen después del proceso de consolidación es considerable. Robinsky propone realizar el ensayo de permeabilidad durante el ensayo de consolidación utilizando una celda con un diámetro interno de 100 mm y una altura de 150 mm (Robinsky, 1999) después de que cada carga en la consolidación se ha estabilizado. De este modo, es posible determinar la permeabilidad del relave a medida que se va compactando por peso propio, es decir, se obtiene la variación de la permeabilidad en profundidad, como se observa en la Figura 2.2. Las dimensiones propuestas por Robinsky se deben a que el aparato de consolidación geotécnico convencional no puede acomodar un espesor adecuado de relaves.

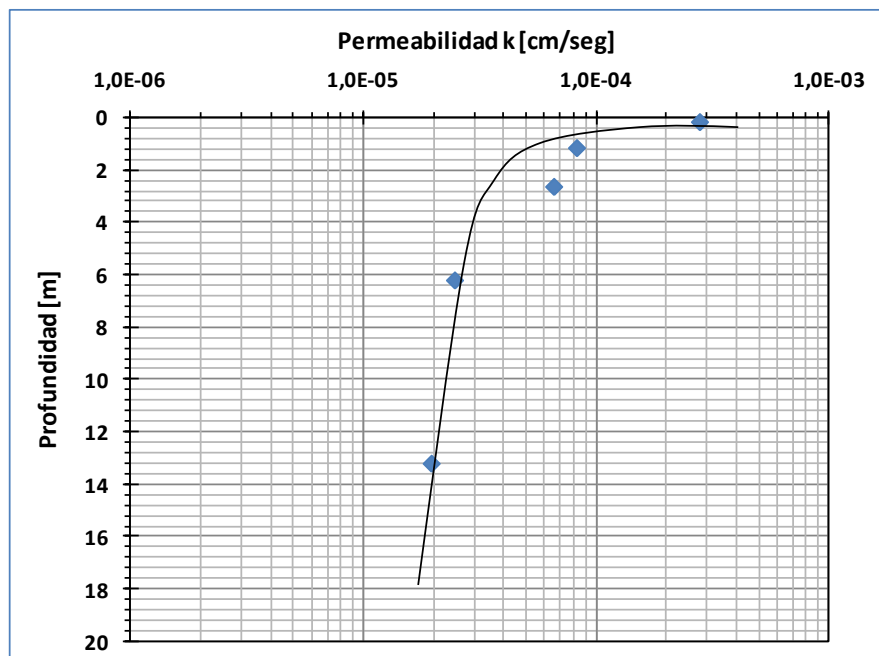


Figura 2.2: Ejemplo de ensayo de permeabilidad en celda de consolidación (Información de proyecto facilitado por SNC-Lavalin).

2.3 Antecedentes sobre Infiltración

Uno de los aspectos más importantes que se deben resolver para obtener los permisos ambientales en el diseño de un tranque de relave es la infiltración de líquidos hacia el suelo natural. Ante esto, la tecnología de relaves espesados se está transformando cada vez más en una alternativa a los relaves convencionales, debido a que éstos, según diversos autores, disminuirían la carga hidráulica y, por lo tanto, el riesgo de que líquidos contaminados percolen hacia el subsuelo (Simms, 2005; Jewell, 2010). Otros autores han mencionado también que existiría una disminución en la permeabilidad de los relaves espesados respecto a los relaves convencionales debido a que en los primeros se evita la segregación de partículas (Moreno y Palape, 2008).

No obstante, el comportamiento de los relaves espesados posterior a la depositación es un fenómeno que no está completamente comprendido y existe poca experiencia acerca de cómo cuantificar la infiltración con algún grado de precisión, dado que la cantidad de agua que infiltra podría ser muy reducida, como ha sido mencionado por diversos autores (Simms, 2010; Moreno y Palape, 2008). Este aspecto no sólo es un problema de diseño durante el período de operación de una mina sino que también es importante tanto para los períodos de cierre como de post-cierre.

Simms ha afirmado que la evaporación sería la variable que controla en gran parte el comportamiento de los relaves, tanto en términos de resistencia como drenaje (Simms, 2010). Robinsky (1999) ha indicado que el tamaño de las partículas de relave y la

evaporación a la cual está sujeta la capa superior de relave, haría que las fuerzas capilares fuesen superiores a la gravedad, generando una succión en dirección vertical hacia arriba.

Moreno y Palape (2008), a su vez, postulan que no existe claridad acerca de la cantidad de agua que infiltra en el suelo natural, la tasa a la que lo hace y la profundidad que puede alcanzar, lo cual dependería de las características de los relaves, los tratamientos o métodos de impermeabilización del terreno natural, las condiciones climáticas y otros factores de menor importancia.

2.3.1 Ensayos de laboratorio

2.3.1.1 Ensayos de Infiltración propuestos por Robinsky

Robinsky fue el precursor de un ensayo para evaluar el movimiento de los líquidos de los relaves una vez dispuestos sobre la superficie del suelo natural. El objetivo del ensayo propuesto inicialmente por Robinsky fue determinar la cantidad y efecto de la succión por capilaridad que sería movilizada en los relaves sobre el nivel freático (Robinsky, 1999). El propósito fue responder las siguientes interrogantes:

- 1) Si la infiltración hacia abajo debido a las fuerzas de gravedad puede ser prevenida por la evaporación desde la superficie, y
- 2) Cuál es el aumento en porcentaje de sólidos que es posible lograr debido al desarrollo de presiones de poro negativas.

El aparato para modelar esta situación consistió en un cilindro de 1.5 m de alto y 90 mm de diámetro interno cerrado en la parte inferior. Un filtro geotextil fue colocado interiormente en la parte inferior. Un pequeño tubo plástico se conecta con el interior del cilindro a través de su base. El otro extremo del tubo plástico se encuentra inmerso dentro de un recipiente con líquidos del proceso de relaves. El nivel del líquido en el recipiente representaría el nivel freático en el ensayo. Para secar la superficie del relave se utilizó una lámpara, un ventilador y una manguera para inyectar aire simulando condiciones de terreno. La manguera puede ser extendida hasta la profundidad que se desee dentro del cilindro para mantener condiciones de secado uniforme a medida que la superficie baja debido a contracción. Dos ensayos fueron realizados por Robinsky con este aparato en principio.

En el primer ensayo, el cilindro fue llenado completamente y de una sola vez con relaves a un 66% de sólidos. La consolidación comenzó inmediatamente, lo que se

aprecia por el flujo de líquido cayendo dentro del recipiente y por el descenso progresivo de la superficie de relaves. La superficie de los relaves a lo largo de este periodo permanece inundada por el agua, la cual es empujada hacia arriba debido a la consolidación de los relaves. Eventualmente el flujo hacia abajo de líquido se detuvo, la superficie de los relaves permaneció inmóvil y seca. La superficie de agua en el recipiente comenzó a descender mostrando que la succión capilar fue subiendo el líquido de vuelta hacia arriba a la superficie de evaporación.

En el segundo ensayo, para simular de mejor manera las condiciones de terreno, el experimento fue repetido usando una estructura estratificada. Investigaciones de terreno han revelado que los depósitos de relave in situ consisten en estratos homogéneos, es decir, la humedad o densidad varían en los distintos estratos pero la granulometría es la misma. Esto se estableció a partir de muestreo vertical continuo, a diferentes distancias del centro del depósito, y numerosos ensayos granulométricos. Observaciones del comportamiento real de la depositación confirman que de hecho, todo el depósito está conformado por numerosos estratos que alternadamente se secan para ser nuevamente inundados por la capa siguiente (Robinsky, 1999). Los estratos parecen variar entre 15 mm y 50 mm de espesor.

En la experiencia, los relaves a 60% de porcentaje de sólidos se vertieron dentro del cilindro en estratos de aproximadamente 50 mm. A cada uno de los 33 estratos se les permitió consolidar lentamente antes de que el siguiente estrato fuera colocado.

Primero, ensayos de permeabilidad y capilaridad-succión fueron realizados. Los ensayos de permeabilidad fueron realizados inundando el cilindro, induciendo flujo hacia abajo. Los ensayos de succión capilar fueron realizados a través de la evaporación por la superficie. Se observó que la capilaridad-succión hacia arriba es más rápida que el flujo hacia abajo, lo cual se infiere de la tasa en que el recipiente con líquido se fue vaciando.

Cuando los relaves en el cilindro habían disminuido hasta una altura de 1.36 m, los porcentajes de sólidos y contenidos de humedad fueron medidos dentro del cilindro muestreando continuamente cada 60 mm de profundidad. Los resultados mostraron que la simulación de las condiciones de terreno reales fue lograda. Un alto porcentaje de sólidos fue alcanzado por capilaridad en este ensayo a lo largo de la altura del cilindro.

El experimento probó de forma concluyente, según Robinsky (1999), que la capilaridad o succión matricial detiene el flujo hacia abajo. Además, la succión matricial consolidó el contenido del cilindro.

2.3.1.2 Ensayos de Infiltración propuestos por otros autores

Junqueira (2011) desarrolló ensayos de laboratorio para evaluar el rol de la evaporación y el drenaje hacia el subsuelo en la remoción de agua en arenas de relave de petróleo depositadas con distintos espesores, midiendo la pérdida de agua de los relaves por ambos efectos. Los materiales utilizados por Junqueira están compuestos por 26% de arenas y 74% de finos, donde el 17% de material corresponde a tamaño arcilla.

Tres tipos de ensayo fueron realizados por Junqueira: a) Columnas de evaporación, b) Columnas de drenaje, y c) Columnas de evaporación y drenaje. En las columnas de evaporación sólo se midió remoción de agua producto de la evaporación. Las columnas de drenaje consistieron en relaves colocados sobre un estrato de arena saturada con la parte superior de los relaves fue cubierta para evitar la evaporación. En las columnas de evaporación y drenaje se midió la remoción de agua desde los relaves asociada a ambos efectos. La duración de los ensayos varió entre 65 y 72 días.

Las columnas utilizadas por Junqueira fueron construidas utilizando acrílico transparente, de diámetro 15,24 cm y alturas variando entre 20 cm y 120 cm. Los relaves espesados con un contenido de sólidos del 55% fueron colocados en las columnas en capas de 20 cm, 40 cm y 100 cm de espesor. El espesor de la capa de drenaje, cuando fue colocada, fue de 20 cm de espesor para todos los ensayos. Esta capa se mantuvo saturada durante todo el ensayo.

La pérdida de agua asociada a la evaporación fue registrada en términos de cambio en masa pesando las columnas tres veces a la semana. Para las columnas de drenaje y drenaje más evaporación, el drenaje fue colectado a través de una salida de drenaje y el volumen de agua colectado registrado periódicamente a través de la masa de agua fluyendo hacia afuera de las columnas. La masa de agua evaporada fue deducida de la masa total de la columna.

Para las columnas de drenaje más evaporación, un set de tensiómetros fue instalado en la parte superior de las columnas para monitorear la evolución de la succión durante los ensayos. La Figura 2.3 presenta una columna de evaporación más drenaje de 40 cm de espesor, utilizada por Junqueira et al. (2011).



Figura 2.3: Ensayo de columna de drenaje más evaporación de 40 cm de espesor. Estrato de drenaje y sistema de colección en la parte inferior con relaves y tensiómetros en la parte superior (Junqueira et al, 2011).

Las Figuras 2.4 y 2.5 presentan la evolución de la pérdida de agua en las columnas de drenaje y en las columnas de evaporación en términos de masa total y pérdida de agua promedio diaria, respectivamente.

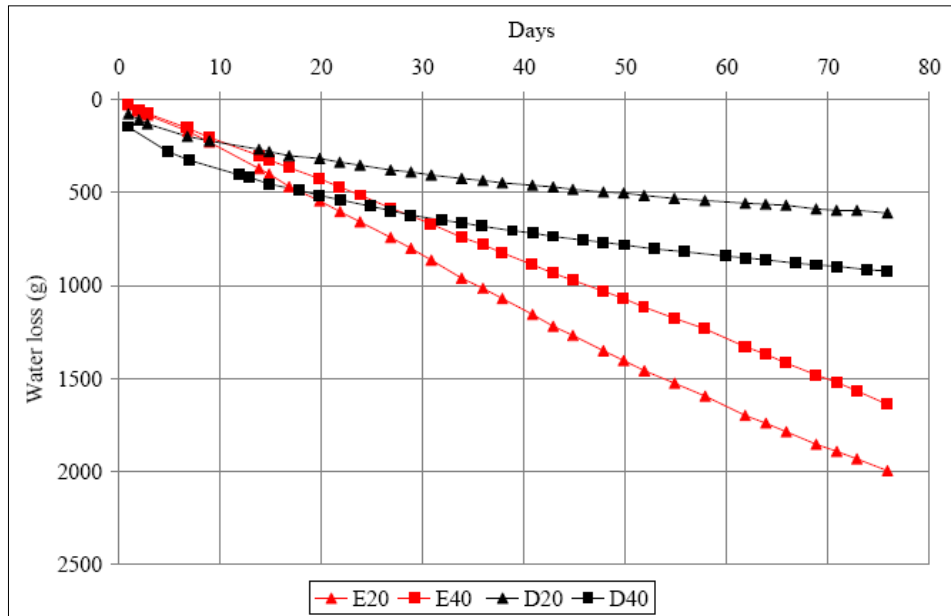


Figura 2.4: Evolución de la pérdida de agua por evaporación (E) y drenaje hacia el subsuelo (D) para las columnas de 20 cm y 40 cm de espesor (Junqueira, 2011).

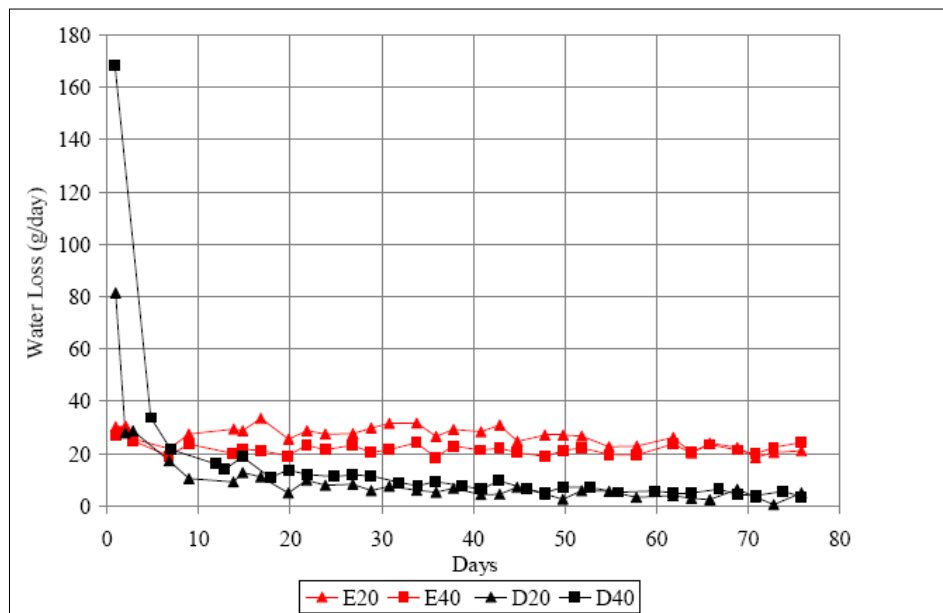


Figura 2.5: Pérdida de agua promedio diaria por evaporación (E) y drenaje hacia el subsuelo (D) para las columnas de 20 cm y 40 cm de espesor (Junqueira, 2011).

Los resultados permiten inferir que la evaporación desempeñaría el papel principal en el proceso de remoción de agua, mientras que el drenaje hacia el subsuelo sería marginal. Estos ensayos también permiten observar que la pérdida de agua por evaporación ocurrió a una tasa relativamente constante, mientras que la tasa de drenaje hacia el subsuelo se reduce progresivamente con el tiempo.

En las columnas de drenaje también se puede observar que desde el día 50 hasta el final de los ensayos, la tasa de pérdida de agua debido al drenaje hacia el subsuelo fue similar para ambas columnas, lo que sugiere que el aumento del espesor de las capas en que se depositan los relaves no necesariamente generaría un importante aumento en la pérdida de agua por drenaje hacia el subsuelo en el largo plazo. Junqueira et al (2011) sugiere que la reducción en las tasas de drenaje de todas las columnas estaría relacionada con la disminución de la permeabilidad en la parte inferior de los relaves. Junqueira también hace mención a otro factor que podría haber afectado la remoción de agua debido a drenaje hacia el subsuelo; la migración hacia abajo de bitumen, ya que sus ensayos fueron realizados en relaves de petróleo. Junqueira menciona que en todas las columnas, una capa oscura de bitumen fue observada moviéndose hacia abajo progresivamente. Al final de los ensayos, bitumen fue observado en la interfaz entre los relaves y el estrato de drenaje, lo que pudo haber reducido la permeabilidad de esta zona afectando las tasas de drenaje hacia el estrato inferior.

La Figura 2.6 presenta los resultados de las columnas de evaporación más drenaje, los que confirman las observaciones recogidas de los ensayos previos.

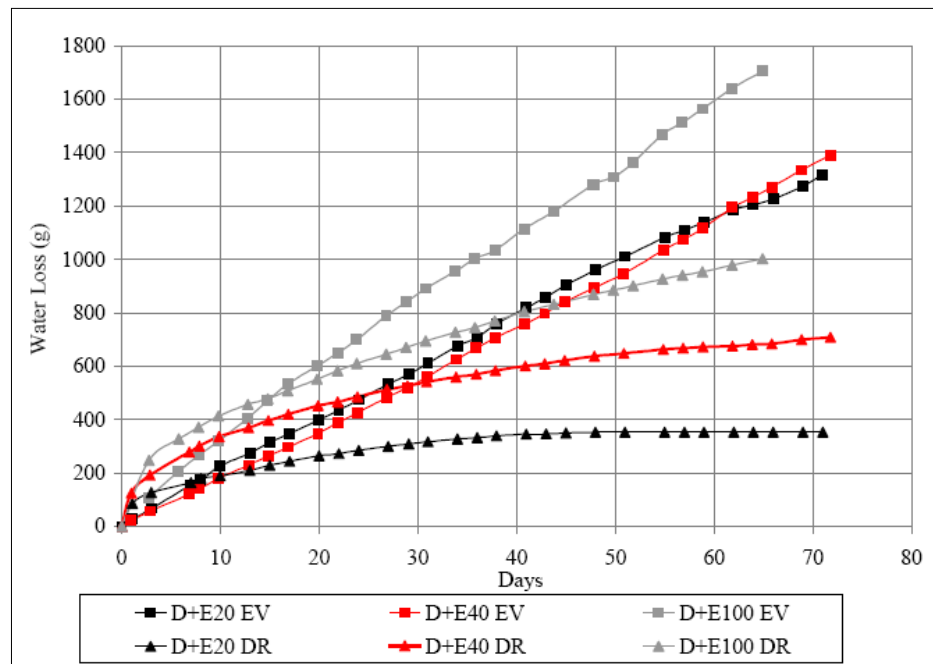


Figura 2.6: Evolución de la pérdida de agua debido a evaporación (EV) y drenaje hacia el subsuelo (DR) para las columnas de evaporación más drenaje (Junqueira, 2011).

La Figura 2.7 muestra la pérdida total de agua debido a evaporación y drenaje hacia el subsuelo para todos los distintos espesores ensayados, así como cantidades de agua estimadas en los relaves al comienzo de los ensayos. De este modo, el ensayo D+E20

corresponde a una columna donde se permitió drenaje y evaporación y la capa de relave fue de 20cm. Estos resultados, aparte de lo que se había visto previamente en cuanto al dominio de la evaporación en el proceso de secamiento, muestran también que la razón entre la pérdida total de agua y la cantidad de agua inicial en los relaves es menor para mayores espesores de relave.

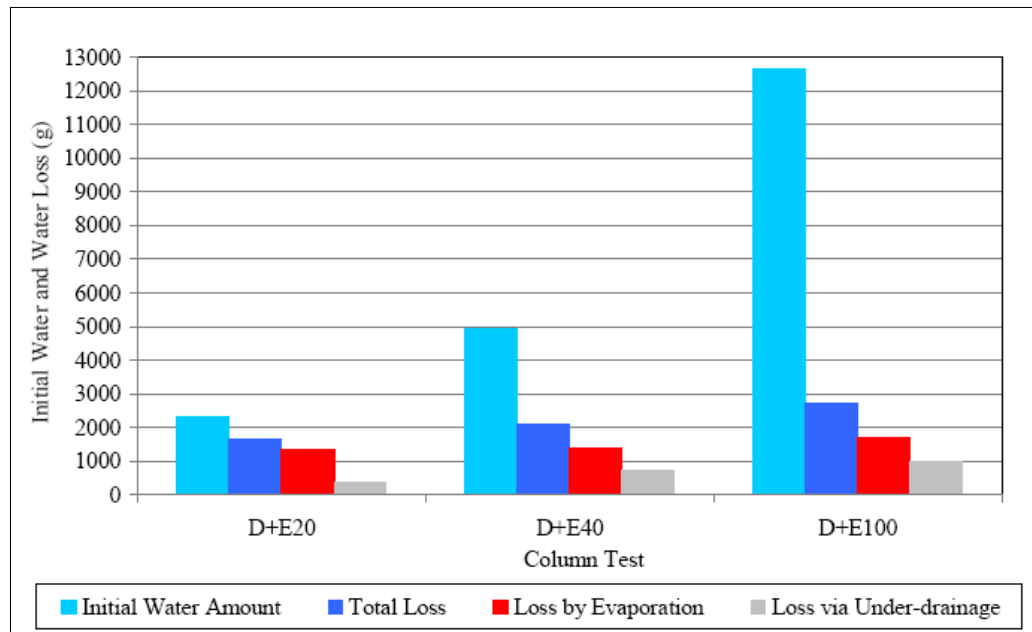


Figura 2.7: Pérdida total de agua debido a evaporación y drenaje hacia el subsuelo para las columnas de evaporación más drenaje.

Simms et al. (2005) también realizaron ensayos de laboratorio para evaluar el secado por evaporación en relaves espesados. Entre los ensayos que realizaron, se cuenta con ensayos de gran escala (alrededor de 2 m² de área) en relaves de oro, diseñados para evaluar cambio de volumen macroscópico y albedo (que es el porcentaje que una superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre sí misma) a medida que el relave se seca, y ensayos en muestras más pequeñas diseñados para permitir la medición directa de la evaporación por medio de un balance de masa. Para evaluar el efecto de la radiación utilizó luz artificial.

En estos ensayos, Simms et al. (2005) depositó un estrato de relaves de 10 cm de altura en una caja de 1 m x 2 m, con un contenido de humedad gravimétrica inicial de 38% y luego lo dejaron secar por tres semanas. El agua sobredrenada producto de la consolidación por peso propio no fue drenada hacia fuera sino que sólo se permitió pérdida de agua de los relaves producto de la evaporación. El viento no fue simulado en estos ensayos. La caja utilizada fue de 1 m de alto y las paredes se pintaron de color negro para reducir la reflexión. Dos lámparas de haluro de 400 W colocadas 1 m sobre la superficie de relaves fueron utilizadas para generar radiación.

Los ensayos de infiltración de laboratorio no sólo son capaces de indicar tendencias acerca del secamiento de los relaves, sino que además son útiles para calibrar modelos numéricos que permitan predecir la pérdida de agua bajo distintas condiciones de terreno (Junqueira, 2011).

2.3.2 Ensayos de terreno

Moreno y Palape (2010) han realizado pruebas con plantas espesadoras a escala en conjunto con modelos matemáticos para el diseño de tranques de relaves espesados de cobre. La planta espesadora fue construida, en el desierto de Atacama y contó de un diámetro de 0.9 m para producir una densidad de diseño del slurry de 67% de sólidos (por peso). Además se instaló una bomba para transportar los relaves hasta un único punto de descarga central de tal forma que los relaves pudieran extenderse de forma cónica directamente sobre la superficie natural consistente en depósitos aluviales.

El programa de estos ensayos incluyó la toma de muestras periódicamente, tanto de los relaves depositados, como del suelo natural durante y después de la depositación de los relaves. Luego se midió en laboratorio la variación de la humedad, propiedades gravimétricas y las características de los relaves y suelo natural en estado saturado y no saturado.

2.3.3 Modelos numéricos

Los modelos numéricos han sido utilizados comúnmente para evaluar la remoción de agua desde los relaves (e.g. Simms et al., 2005, 2007 y 2010, Junqueira et al. 2009).

Simms et al (2005), simuló la evolución de la succión, el cambio de volumen y la humedad de los relaves en los ensayos de laboratorio que realizó usando un modelo unidimensional no saturado de flujo acoplado de vapor y líquido. Los resultados fueron comparados con mediciones de terreno con el fin de dar un primer paso en la evaluación de la capacidad de los modelos de flujo no saturado para representar procesos de secamiento en terreno y desarrollar directrices para su uso en planes de depositación.

Simms (2010), realizando ensayos desde entonces y afirma que los procesos de secamiento de relaves en pasta depositados en superficie pueden ser razonablemente predichos usando modelos de flujo no saturado, tanto para condiciones controladas en laboratorio, como en condiciones de terreno relativamente áridas.

El año 2010, Simms (2010) presentó nuevos modelos donde el clima, el espesor de capa, propiedades de retención de agua y conductividad hidráulica de los relaves, y contenido de humedad al momento de la depositación fueron las variables utilizadas.

Análisis genéricos de la evaporación y flujo saturado en pilas multicapa en relaves de oro usando modelos de flujo saturado convencionales fueron realizados (Fisseha et al., 2009 y 2010; Simms et al., 2007 y 2009). Estos modelos mostraron que considerar una sola capa aislada puede llevar a subestimar el tiempo de secamiento necesario para lograr una humedad o densidad dada. También se observó que la capa de relaves seca depositada previamente tiene una importante influencia en la tasa de secamiento de la capa fresca depositada posteriormente y, de hecho, puede hacer que sea imposible para la capa superior alcanzar una humedad determinada a través de secamiento por efecto de la acción atmosférica y el drenaje hacia el suelo natural solamente. Sin embargo, se propone como una solución potencial la “rotura” de la conexión entre el estrato fresco depositado y la capa inferior.

Moreno y Palape (2008) también quisieron simular los resultados de sus ensayos de terreno, para lo cual utilizaron el software VS2Dti del U.S. Geological Survey para la modelación (Hsieh et al, 2000). Dentro de los modelos realizados incorporaron condiciones in-situ tales como el contenido de humedad del suelo natural y la tasa de evaporación para calibrar el modelo. Se realizaron corridas para distintos espesores de capa de los relaves frescos con periodos de evaporación de 30 días entre cada depositación. Luego se compararon las humedades de los relaves y del suelo natural predichas por los modelos con aquellas observadas en terreno.

Los resultados de la investigación realizada por Moreno y Palape, al igual que el resto de los autores, mostró bajos potenciales para la infiltración y limitada profundidad de alcance de los líquidos hacia el suelo natural. En esta investigación también se mostró que la profundidad de los suelos naturales afectadas por la infiltración de líquidos desde los relaves depende del espesor de la capa inicial de relaves depositada, limitándola a un máximo de 2 m. Las capas depositadas con posterioridad sobre la primera capa de relaves, no tendrían influencia en la infiltración en el suelo natural.

Los mismos autores que han trabajado en la modelación del fenómeno de flujo en relaves espesados, han planteado limitaciones acerca de estos modelos. Por ejemplo, Junqueira et al. (2011), ha mencionado que existen limitaciones de los modelos asociadas con los grandes cambios de volumen y falta de información de laboratorio acerca de la infiltración de líquidos desde los depósitos de relave hacia el subsuelo y de la evaporación que permitan calibrar los modelos. Simms et al., (2010), menciona que pese a que existen metodologías que han sido aplicadas en diversos estudios de laboratorio y un caso de terreno, como la presentada por él mismo y otros autores (Simms et al., 2010), se debe tener precaución si se quiere aplicar los resultados, ya que los modelos aún podrían requerir calibraciones y refinamientos adicionales.

3 PROGRAMA DE ENSAYOS

3.1 Introducción

Este capítulo incluye toda la información acerca del programa de ensayos realizado como parte de este estudio. En la sección 3.2 se describen los suelos utilizados, los cuales corresponden a tres relaves distintos y dos suelos naturales que simulan el suelo de fundación de los depósitos.

En la sección 3.3 se presenta el detalle del programa de ensayos, tanto los realizados por la autora como ensayos relevantes para la investigación que fueron facilitados por SNC-Lavalin y son utilizados en el análisis. Dentro del programa de los ensayos descritos en este capítulo se incluyen los ensayos de caracterización completa para los suelos de fundación, ensayos de retención de agua y el ensayo de infiltración efectuado durante este estudio. Se describen en esta sección tanto los equipos como la metodología utilizados, dando especial énfasis al ensayo de infiltración, el cual fue desarrollado especialmente para esta investigación ya que no existen metodologías normadas.

3.2 Suelos utilizados

A continuación se presentan los materiales utilizados en el estudio.

3.2.1 Muestras de relaves

Se utilizaron tres relaves correspondientes a excedentes de los procesos de concentración por flotación de cobre, zinc y molibdeno. El requisito que debían cumplir los materiales para ser utilizados en esta investigación era que permitiesen formar pasta, para lo cual debían tener una gran cantidad de material fino.

Los tres relaves utilizados fueron facilitados por SNC-Lavalin, en donde se les caracterizó completamente mediante los ensayos propuestos por Robinsky (ver Capítulo 2) para estudios anteriores. Esta información fue otorgada por la empresa y en la presente investigación no se repitieron estos ensayos.

La Tabla 3.1 muestra la denominación dada a cada relave, el mineral extraído del proceso de flotación en el cual se generó, y el tipo de depósito del cual proviene el relave.

Tabla 3.1: Muestras de Relaves.

Denominación	Mineral Extraído	Tipo de depósito de proveniencia
Relave N°1	Cobre	Depósito construido con la técnica de relaves espesados.
Relave N°2	Cobre, Zinc y Molibdeno (de un yacimiento inmerso en caliza)	Depósito de relaves convencional, con material apto para depositar espesado, según estudios previamente realizados.
Relave N°3	Cobre	Depósito proyectado con diseño de relaves espesados.

Los relaves fueron recibidos en pulpa y secados en horno a 60°C antes de ser sometidos al programa de ensayos. La caracterización geotécnica de los relaves espesados se presenta en el Capítulo 4.

3.2.2 Muestras de suelos de fundación

Los materiales utilizados como suelo de fundación fueron extraídos de dos sitios donde se construirán depósitos de relave. De estos materiales no se cuenta con información de ensayos realizados anteriormente, por lo que el programa de ensayos de la investigación incluye la caracterización completa de estos dos suelos.

Los suelos se seleccionaron considerando que el tamaño de las partículas no sobrepase 1/6 del diámetro del cilindro de ensayo y que las granulometrías fueran suficientemente diferentes para poder realizar comparaciones. Además, para poder realizar mediciones de humedad con los sensores utilizados, es necesario que las partículas no superen los 5.2 mm de diámetro.

A modo de simplificar, a los suelos se les denominará como Suelo de Fundación 1 (SF1) y Suelo de Fundación 2 (SF2).

3.3 Ensayos

Los ensayos realizados se llevaron a cabo en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. A continuación se describen las metodologías utilizadas para cada ensayo, incluyendo aquellos ensayos facilitados por SNC-Lavalin.

3.3.1 Caracterización geotécnica de suelos

Sobre las muestras de suelo de fundación se realizaron ensayos de caracterización. Los ensayos incluidos en la caracterización y los métodos utilizados para su realización (basados en las normativas vigentes) se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Ensayos de caracterización de suelos de fundación.

Ensayo	Norma
Granulometría de suelos hasta un tamaño de 75 μm (malla #200)	ASTM D422 - 63(2007)
Límites de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad)	ASTM D4318-05
Peso específico	ASTM D854 - 10
Clasificación de suelos según USCS	ASTM D2487 - 11
Proctor modificado	ASTM D 1557-70
Densidad Máxima y Mínima	NCh 1726
Permeabilidad	ASTM D2434 - 68(2006)

Dado que los ensayos realizados siguen los procedimientos especificados en las normativas vigentes, no se detallarán en esta investigación.

En el caso de los relaves, los resultados fueron entregados por SNC-Lavalin y los ensayos siguieron las metodologías propuestas por Robinsky detalladas en el Capítulo 2.

3.3.2 Curva de retención de agua en suelo

Cuando el suelo no está saturado, el agua que permanece dentro de él se encuentra retenida a una presión menor que la atmósfera, lo cual se califica como una presión negativa, es decir, una “succión”. La curva de retención de humedad refleja la capacidad de un suelo o cualquier otro medio permeable para retener el agua en función de la succión ejercida.

Se solicitaron al laboratorio de la Estación Experimental La Platina, perteneciente al INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias), realizar ensayos para evaluar la capacidad de retención de agua de los suelos y relaves utilizados en esta investigación. Para la ejecución de los ensayos se utilizó la metodología descrita en la norma ASTM D 2325.

3.3.3 Ensayos de infiltración del agua de relaves sobre suelos naturales

Como se mencionó anteriormente, en esta investigación se implementó un ensayo de laboratorio para medir la variación de la humedad de un suelo al depositar sobre él una capa de relave espesado.

Para esto se construyeron moldes cilíndricos de acrílico de diferentes alturas, dentro del cual se coloca primero una capa de material compactado simulando el suelo de fundación de los depósitos y sobre éste una capa de relave espesado. Debido al contenido de agua de la pasta de relave se produce una infiltración, la cual será medida a distintas profundidades, tanto en el relave como en el suelo de fundación. Para esta medición se utilizan sensores de humedad, los que a su vez están conectados a un sistema de adquisición de datos de registro continuo.

Para simular el efecto de la evaporación producida en terreno se utilizó una lámpara de calor infrarroja. Para determinar la evaporación producida debido a la radiación, se construyeron evaporímetros de superficie libre y de suelos saturados.

El ensayo se realizó utilizando combinaciones entre los suelos y relaves disponibles. Para cada suelo se realizó una calibración de los sensores a través de la medición de humedad de manera convencional.

3.3.3.1 Equipos utilizados

Como moldes del ensayo se utilizaron cilindros de acrílico de 9,6 cm de diámetro, y de 40 y 50 cm de largo. Se escogió un acrílico de 3 mm de espesor, para soportar la compactación de suelo que se realiza una vez que este se deposita dentro del cilindro.

El sistema de adquisición de datos consistió en 12 sensores de humedad EC-5 de Decagon Devices, un datalogger CR1000 y software PC200W de Campbell Scientific. Los sensores de humedad EC-5, mostrados en la Figura 3.1, corresponden a sensores de tipo capacitivo, que miden la humedad mediante la medición de la constante dieléctrica del suelo. Estos valores pueden variar con la mineralogía y densidad, para lo

cual se realizó una calibración para cada sensor en todos los tipos de suelo utilizados. Las especificaciones técnicas del sensor se muestran en la Tabla 3.3.



Figura 3.1: Sensor de humedad EC-5.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas de sensor de humedad EC-5 Decagon.

Tiempo de Medida	10 ms (milisegundos)
Precisión con calibración específica	$\pm 2\%$ ⁽¹⁾
Resolución	0,25%
Intervalo de temperatura	-40 to +60 °C
Rango de medición	0 a saturación
Dimensiones del sensor	8,9 cm x 1,8 cm x 0,7 cm
Longitud de cable	5 m estándar
Cable conector	Conector estéreo estándar

⁽¹⁾ Esta humedad corresponde a humedad volumétrica y equivale a un 1,2% de humedad gravimétrica para los suelos de fundación utilizados. En el caso de los relaves la precisión en términos de humedad gravimétrica es variable a lo largo del ensayo debido al cambio en la densidad de los relaves.



Figura 3.2: Datalogger CR1000.

Para la simulación de las condiciones climáticas se utilizó una lámpara de calor de luz infrarroja de 250 W que permitiese obtener una evaporación similar a la producida en terreno por diversas variables, como radiación, presión, temperatura y viento. Para medir la evaporación producida por la radiación de la lámpara se elaboraron dos tipos de evaporímetros, uno de superficie libre y el otro de relave saturado. Por otro lado, se registraron las temperaturas y humedades relativas del lugar, utilizando un termómetro de registro continuo más el software RS232 (Ref. 7).

3.3.3.2 Calibración de Sensores

Los sensores EC-5 de Decagon miden la humedad del suelo mediante la medición de la constante dieléctrica que está directamente relacionada con el contenido de agua del suelo. Debido a variaciones en la densidad, la mineralogía, la textura y la salinidad del suelo, la calibración genérica para los sensores puede ser mejorada mediante calibraciones específicas para cada suelo y sus respectivas características, mejorando la precisión en las mediciones.

El método de calibración de los sensores de humedad EC-5 utilizado en este estudio es el siguiente:

1. Para cada suelo se preparan 5 a 6 muestras de distinta humedad que cubran el rango de humedades estimadas a alcanzar en el ensayo. En el caso de los suelos naturales es necesario compactarlo a la misma densidad con que se ensayará posteriormente.
2. Se inserta el sensor a calibrar cuidando de no introducir espacios de aire entre el sensor y el suelo, y de modo que sus sondas queden completamente cubiertas. Se mide el voltaje que éste entrega.
3. Se saca el sensor de la muestra e inmediatamente se extrae el suelo que rodeó al sensor.
4. Se mide la humedad de la porción de suelo, registrando su peso húmedo inmediatamente luego de ser extraído, y luego su peso seco después de permanecer 24 horas al menos en un horno de temperatura estable de 100°C.
5. Se repite el mismo procedimiento para las siguientes muestras con distinta humedad.

6. Con los voltajes y humedades, se obtiene la relación del sensor para ese suelo, la que es utilizada posteriormente en el procesamiento de los datos.

Si bien los sensores debiesen ser iguales, por lo que la calibración específica de un sensor podría ser aplicada a todos los otros sensores de este tipo en ese suelo en particular, se observaron algunas diferencias entre los registros. Por esta razón, se calibró cada uno de los sensores para los distintos suelos, de modo de aumentar la precisión de la medición.

3.3.3.3 Procedimiento

El ensayo se inició compactando el suelo de fundación según los valores obtenidos de Proctor Modificado o Densidad Relativa, según corresponda. En terreno, de acuerdo a lo comúnmente especificado, el suelo de fundación debe ser compactado como mínimo a 95% del Proctor Modificado u 80% de la Densidad Relativa. Sin embargo en la investigación, debido tanto a la fragilidad de los sensores de humedad como del molde del ensayo, la compactación posible en laboratorio para el suelo de fundación 2 fue de 82% de la densidad máxima compactada seca según el ensayo Proctor Modificado. Esto supone una condición más favorable para la infiltración, debido a que la permeabilidad es mayor cuando la compactación del suelo disminuye.

El suelo se compactó a humedad nula debido a dos razones. La primera es que esta condición simula la humedad del suelo para climas áridos y la segunda corresponde a que en pruebas iniciales para evaluar el funcionamiento de los equipos se observó que al compactar el suelo húmedo, durante el ensayo se producía un flujo tanto del agua contenida en el suelo como de la infiltrada, dificultando el estudio del efecto de la infiltración. La compactación fue realizada en capas de espesor máximo 3 cm, para obtener una densidad homogénea a lo largo de la columna de suelo.

Una vez compactada toda la columna de suelo, se procedió a la colocación de los sensores. A lo largo del tubo existen perforaciones que permiten insertar horizontalmente los sensores en el suelo. Para controlar fugas de agua se sellaron los espacios con silicona fría al menos dos horas antes de verter el relave. Los sensores se conectaron al datalogger y comenzó la adquisición de datos.

Se preparó el relave a la concentración de sólidos en peso recomendada y se vertió sobre la columna de suelo hasta alcanzar un espesor de 5 cm. Sobre los 5 cm de la capa de relave se tiene una salida de agua que permite que el agua que queda sobre la mezcla escurra.

Para simular el efecto de la evaporación producida en terreno se utilizó en los ensayos una lámpara de calor infrarroja, la cual se mantuvo encendida 6 horas diarias, todos los días, y se ubicó a 40 cm de distancia sobre la superficie del relave. Para determinar la evaporación producida debido al uso del calor y comparar estas con los valores de terreno, se utilizaron evaporímetros de superficie libre y de suelos saturados. Los evaporímetros, que consisten en dos recipientes, uno de agua y otro de pulpa de relave, fueron ubicados a un costado de los ensayos a la altura de la capa de relave. Éstos fueron pesados dos veces al día, previo al encendido de la lámpara y una vez que ésta se apagaba. Así se midió el agua evaporada en los periodos de baja y alta radiación.

Las figuras a continuación muestran el procedimiento de los ensayos de infiltración.



Figura 3.3: Montaje del ensayo que muestra los sensores ubicados en la columna de suelo, los cuales se encuentran conectados al sistema de adquisición de datos.



Figura 3.4: Instalación de Sensores.



Figura 3.5: Descarga de relave espesado.



Figura 3.6: Comienzo de la Infiltración.



Figura 3.7: Aplicación de calor para simular efectos de radiación de terreno.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

El presente capítulo contiene los resultados y discusión de todos los ensayos de infiltración realizados, presentados previamente en el Capítulo 3. El capítulo incluye además las caracterizaciones de los relaves y suelos naturales, obtenidas de ensayos y bibliografía.

4.2 Caracterización geotécnica de suelos naturales

La Figura 4.1 muestra las curvas granulométricas obtenidas para los suelos de fundación. En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de los ensayos de límites de Atterberg, gravedad específica de los sólidos, densidad máxima o mínima o Proctor Modificado, según corresponda, y permeabilidad. La Figura 4.2 muestra las curvas de retención de agua de ambos suelos.

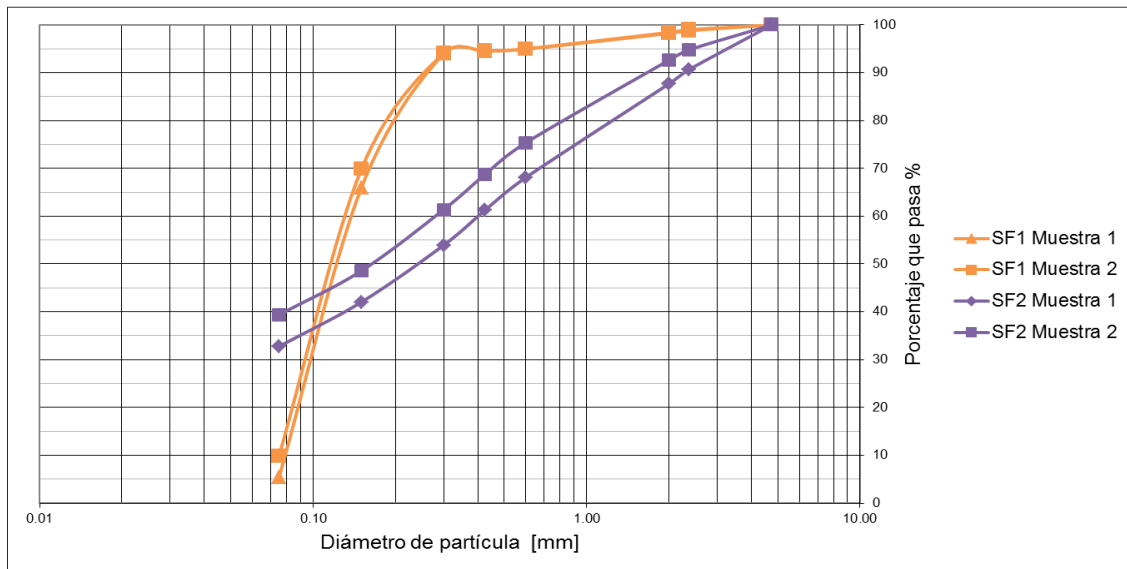


Figura 4.1: Granulometrías de Suelos de Fundación SF1 y SF2.

Tabla 4.1: Propiedades geotécnicas de Suelos de Fundación SF1 y SF2.

Ensayos		SF1	SF2
Límites de Atterberg	Límite Líquido, L.L.	-	28
	Límite Plástico, L.P.	NP	18
	Índice de Plasticidad, I.P.	-	10
Clasificación USCS		SP	SC
Densidad Relativa	Densidad Mínima, $\gamma_{d \text{ min}}$ [g/cm ³]	1.473	-
	Densidad Máxima, $\gamma_{d \text{ máx}}$ [g/cm ³]	1.777	-
Proctor Modificado	D.M.C.S. [g/cm ³]	-	2.035
	Humedad, %	-	10.03
Permeabilidad [cm/s]		7E-04	2E-05

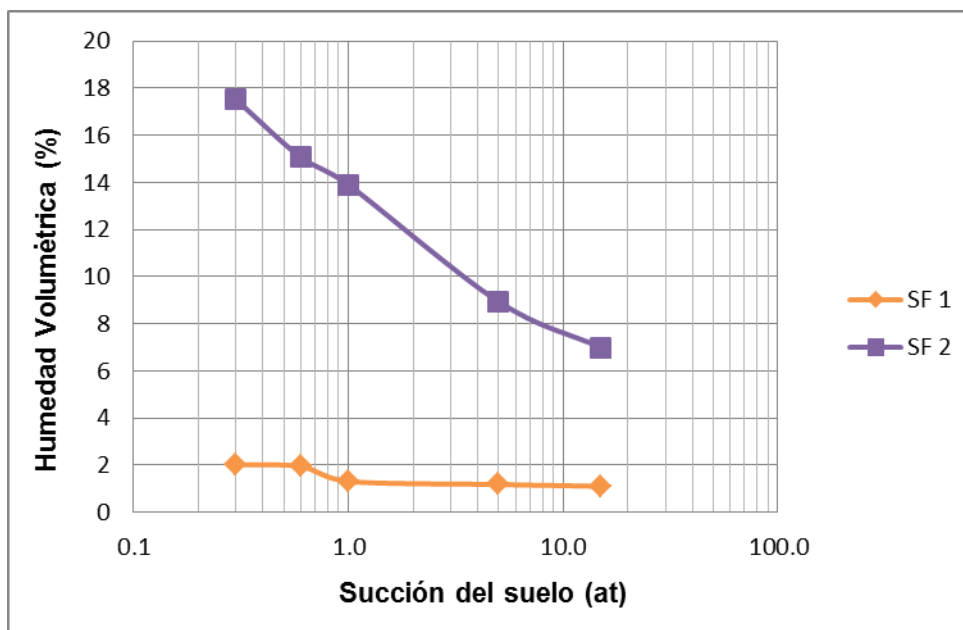


Figura 4.2: Curvas de humedad de Suelos de Fundación SF1 y SF2.

4.3 Caracterización geotécnica de relaves

Los resultados mostrados a continuación fueron facilitados por SNC-Lavalin, y corresponden a los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos recomendados por Robinsky para el estudio de relaves. Para el relave R3 se tienen las propiedades obtenidas para una muestra, mientras que para los relaves 1 y 2 se cuenta con los resultados para dos muestras para cada uno.

En la Figura 4.3 se presentan las curvas granulométricas. La Tabla 4.2 resume los parámetros geotécnicos obtenidos. La Figura 4.4 muestra las curvas de retención de agua de los relaves.

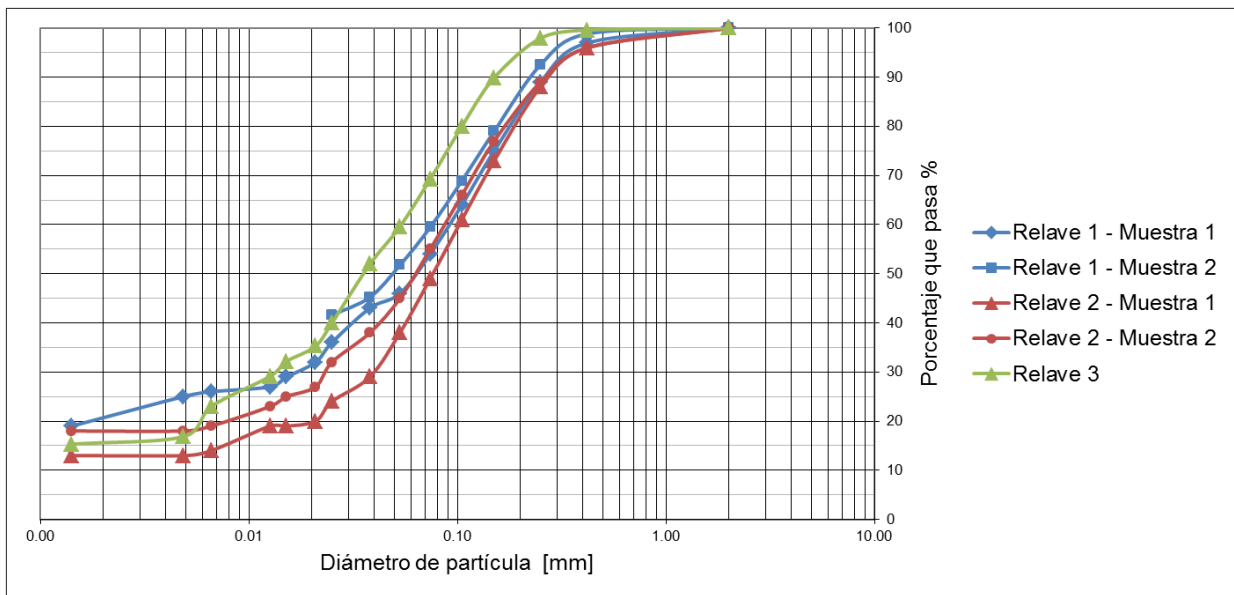


Figura 4.3: Granulometrías de Relaves R1, R2 y R3.

Tabla 4.2: Resumen de Parámetros Geotécnicos

Ensayos	R1 Muestra 1	R1 Muestra 2	R2 Muestra 1	R2 Muestra 2	R3 Muestra 1
Peso Específico	3,01	2.94	3.7	3.7	2.7
Límite Líquido, %	17,2	19.5	14.1	13.1	18.8
Límite Plástico, %	-	-	-	-	18.5
Índice de Plasticidad, %	NP	NP	NP	NP	0.3
Clasificación U.S.C.S.	ML	ML	SM	SM	ML
Límite de Contracción, %	20,4	20,4	17.1	16.6	19.7
Concentración de sólidos, Cp, %	70-71	70-71	78-80	79-81	65-70
Permeabilidad (cm/s)	3E-04	3E-04	4E-04	3E-04	1E-04

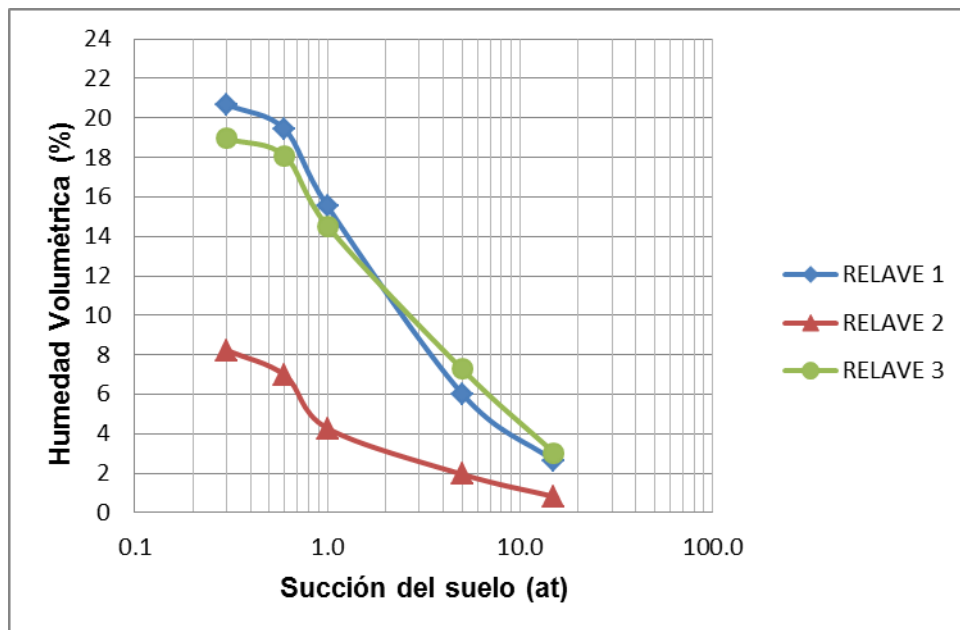


Figura 4.4: Curvas de retención de humedad de Relaves R1, R2 y R3.

4.4 Ensayos de infiltración

En la Tabla 4.3 se muestran los ensayos de infiltración realizados.

Tabla 4.3. Programa de Ensayos de infiltración.

Ensayo N°	Altura Cilindro [cm]	Uso Lámpara	Suelo Fundación	Relave
1	40	SI	SF1	R2
2	40	SI	SF1	R1
3	50	SI	SF2	R1
4	50	SI	SF2	R2
5	40	SI	SF1	R1
6	50	SI	SF2	R3
7	40	SI	SF1	R3
8	50	NO	SF1	R1

En los ensayos donde se utilizó lámpara de calor, esta fue encendida diariamente durante 6 horas, para acelerar la evaporación. La evaporación obtenida bajo este sistema fue medida en los evaporímetros y corresponde a 8.7 mm/día cuando la lámpara está encendida y a 0.9 mm/día cuando la lámpara está apagada, lo que equivale a un promedio de 2.9 mm/día. A modo de referencia, este valor está en el orden de la evaporación que se produce en promedio en un invierno de la cuarta región de Chile (Balance Hídrico de Chile, DGA, 1987).

4.4.1 Resultados generales acerca del comportamiento post depositación de los suelos de fundación y relave

El objetivo de esta sección es presentar las observaciones generales obtenidas a partir de los ensayos, para lo cual se analiza cada fenómeno observado en todos los ensayos a partir de las figuras que lo representen de mejor forma. No obstante, la variación de humedad para todos los sensores en todos los ensayos se muestra en el Anexo A.

- ***La infiltración desde el relave al suelo de fundación se produce principalmente inmediatamente después de la depositación***

Los relaves son depositados con altas humedades, las cuales no logran ser medidas por los sensores, debido a que existe una rápida disminución de la humedad de los relaves inmediatamente luego de depositado el material. Las mezclas de relave son preparadas a una concentración de sólidos en peso de 0,7 para el relave 1, a 0,8 para el relave 2 y a 0,68 para el relave 3, lo que se traduce en humedades de 42,9%, 25% y 47,1% para los relaves 1, 2 y 3, respectivamente. Sin embargo las primeras lecturas de los sensores muestran humedades de 21,5%, 15% y 28% para los relaves 1, 2 y 3.

La razón de este fenómeno es que inmediatamente después de que el relave es depositado, se produce un elevado traspaso de agua desde el relave al suelo de fundación. Este fenómeno había sido observado previamente por otros autores (Junqueira, 2011). Los gráficos de humedad versus tiempo de la Figura 4.5 muestran un rápido aumento en la humedad de la primera capa del suelo apenas se deposita el material. A modo de ejemplo se muestran las curvas obtenidas en el ensayo N°1. Uno de los sensores fue ubicado 2.5 cm sobre el contacto suelo-relave, el resto se ubicó a 2,9, 16 y 23 cm bajo la superficie del suelo en contacto con el relave. En estas curvas es posible ver, además, un aumento en la humedad inmediatamente después de la depositación, la que luego disminuye a una tasa menor o se estabiliza, indicando que la mayor parte de la infiltración ocurre al inicio del ensayo. En caso que exista infiltración posterior esta no alcanza a incrementar la humedad de la capa más superficial del suelo.

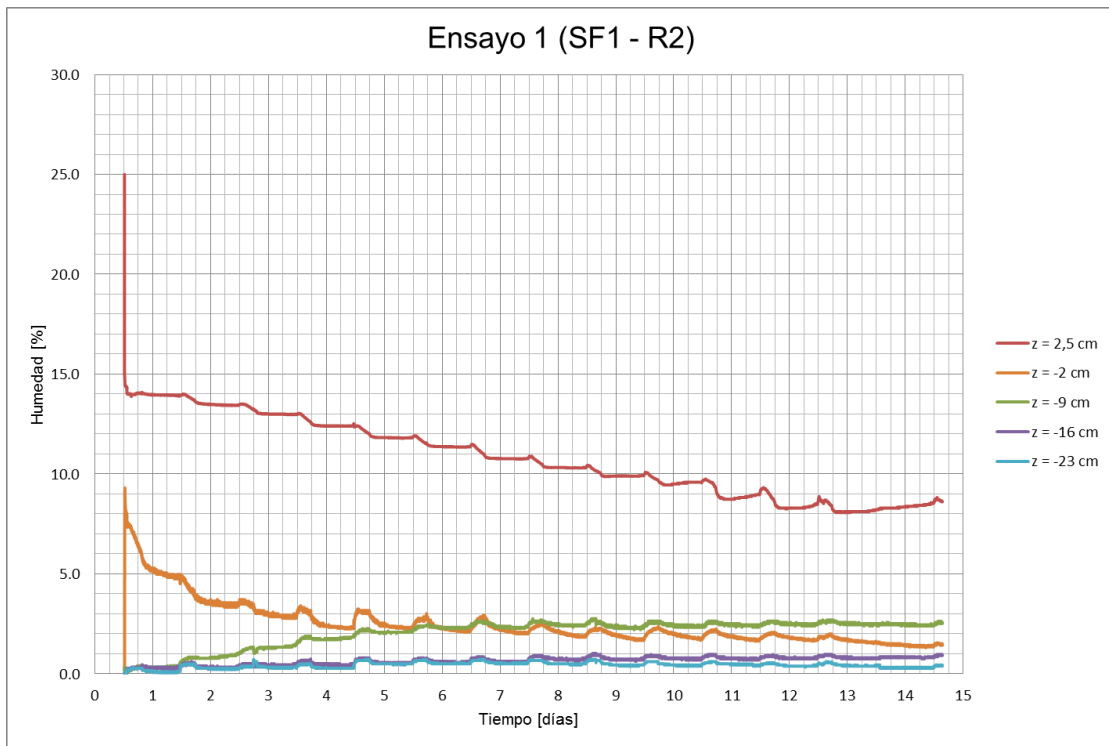


Figura 4.5: Curvas humedad vs tiempo que reflejan el aumento inmediato de humedad de la capa más superficial del suelo.

Este fenómeno de aumento y luego disminución de humedad en la primera capa se grafica, a modo de ejemplo, en la Figura 4.6 donde se muestran los perfiles de humedad del ensayo N°3: al inicio, luego de una hora (momento en que la primera capa alcanza su humedad máxima en este ensayo) y luego a 12 días, donde se aprecia que la primera capa disminuyó cerca de 7% su humedad. La Tabla 4.4 resume las humedades máximas que alcanza el suelo, el tiempo en que alcanza esta humedad y la humedad final de la primera capa para cada uno de los ensayos.

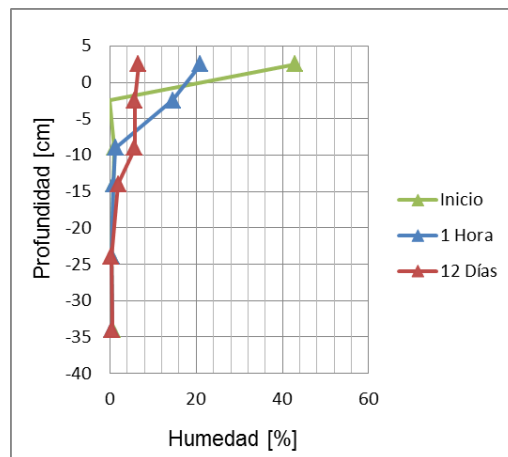


Figura 4.6: Perfiles de humedad al inicio, a 1 hora y a 12 días del Ensayo 3. Reflejan el aumento y luego disminución de humedad para la capa más superficial del suelo de fundación.

Tabla 4.4: Resumen de las humedades máximas, momento en que la alcanza y humedad final de la primera capa para cada uno de los ensayos.

Ensayo	Humedad máxima alcanzada en 1era capa, %	Humedad final en 1era capa, %	Momento de humedad máxima en 1era capa, min	Duración de ensayo en días
1	9.3	1.5	8	15
2	12.5	2.3	17	15
3	14.7	7.1	52	13
4	13	6.4	3	13
6	13.3	5.6	2	2
7	6.5	2.0	53	22
8	9.5	2.6	38	17

- ***La estabilización de la humedad en el suelo de fundación se produce antes que en el relave***

Este fenómeno se puede observar en la Figura 4.5 donde la humedad del suelo de fundación a partir de cierto momento presenta cambios leves en comparación a la variación en la humedad del relave. Esto se debería a que la mayor parte de los cambios de humedad que se estarían produciendo luego de aquel instante serían causados por la evaporación.

- ***Cambio en la tasa de variación de la humedad en los periodos de tiempo donde la lámpara de calor está encendida***

En la Figura 4.7 se muestran las curvas de humedad vs tiempo obtenidas en el ensayo N°3, el detalle de las curvas para los días 3 y 4 se muestra en la Figura 4.8 donde se ha marcado (líneas negras) los instantes en que la lámpara es encendida y apagada.

En estos gráficos se observa que si bien en general el relave va disminuyendo la humedad, la tasa de disminución es mucho mayor en el lapso en que la lámpara está encendida. En algunos casos se observa además que luego de encender la lámpara hay un pequeño aumento en la humedad del relave, lo cual podría deberse a un flujo

vertical hacia arriba en la capa de relave, producido por un aumento en las fuerzas de capilaridad en superficie.

En los suelos de fundación, independiente de si la humedad va aumentando o disminuyendo, al encender la lámpara hay un aumento en la humedad a una mayor tasa, incluso en las capas más profundas, lo que indicaría un flujo vertical hacia abajo en este suelo. Al apagar la lámpara la humedad comienza a disminuir nuevamente en todos los sensores localizados dentro del suelo de fundación, producto, probablemente, de un aumento en las fuerzas capilares debido al secado en superficie.

La explicación física de este fenómeno requiere de mayor investigación.

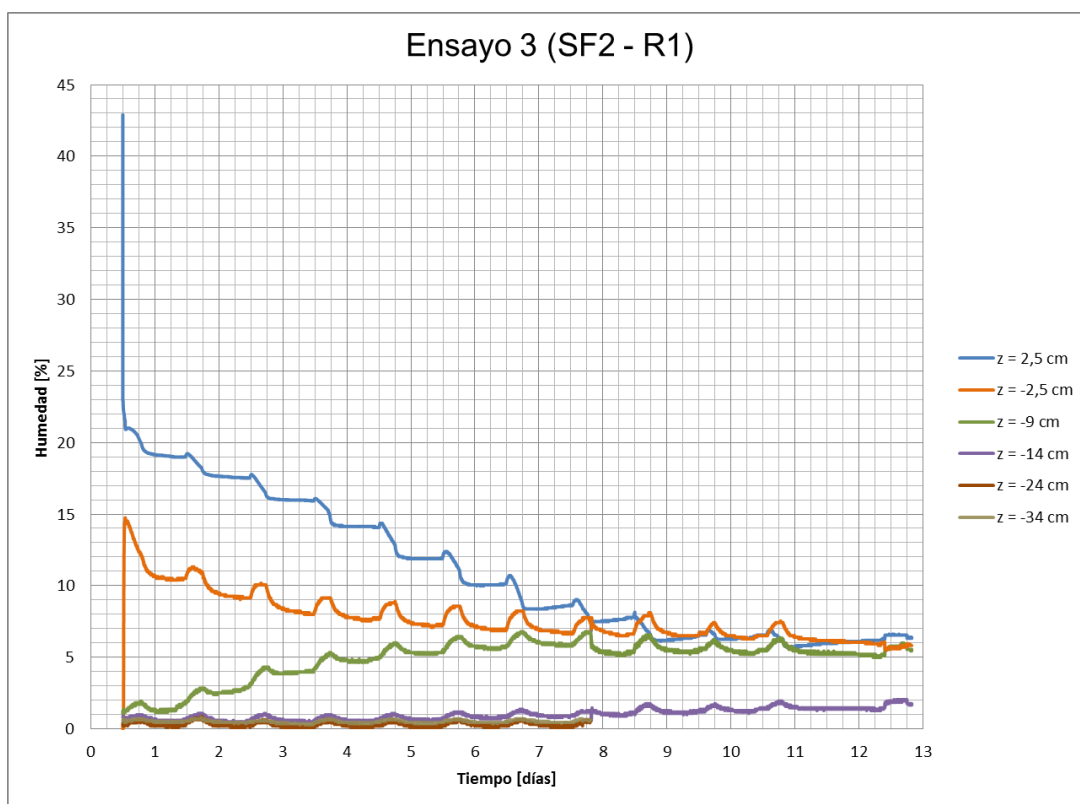


Figura 4.7: Curvas humedad vs tiempo de Ensayo 3.

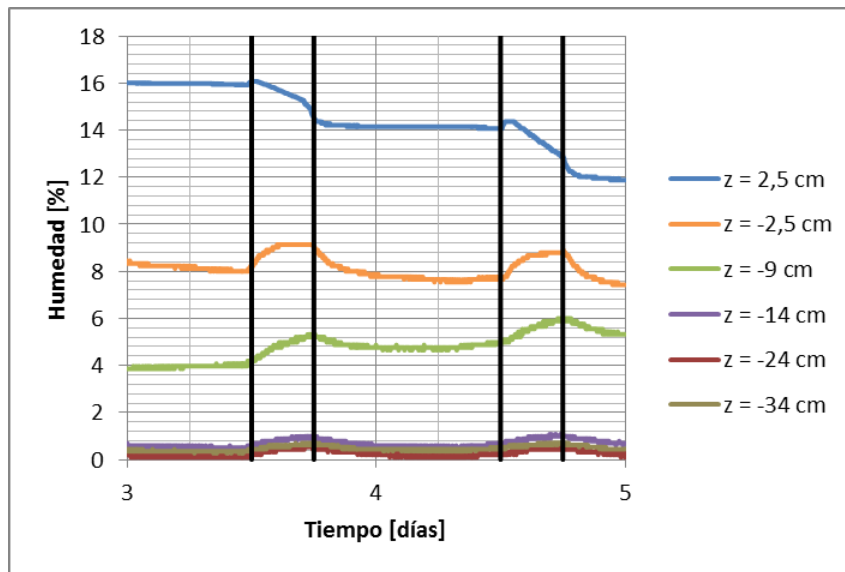


Figura 4.8: Efecto de la lámpara en la humedad. El periodo entre las líneas negras corresponde al lapso cuando la lámpara está encendida.

4.4.2 Influencia de las características del relave

En esta sección se analizan los resultados comparando cómo se ve afectada la infiltración en un mismo suelo de fundación con distintos relaves. Para cada suelo se hicieron tres ensayos donde las características del suelo de fundación se mantuvieron constantes y se varió el relave depositado (con su respectiva humedad de depositación).

La Figura 4.9 muestra los perfiles de humedad al inicio y luego de 14 días de depositado el relave, para los tres ensayos realizados con el suelo de fundación 1. La Figura 4.10 muestra los perfiles de humedad al inicio y a 12 días para los tres ensayos realizados con el suelo de fundación 2.

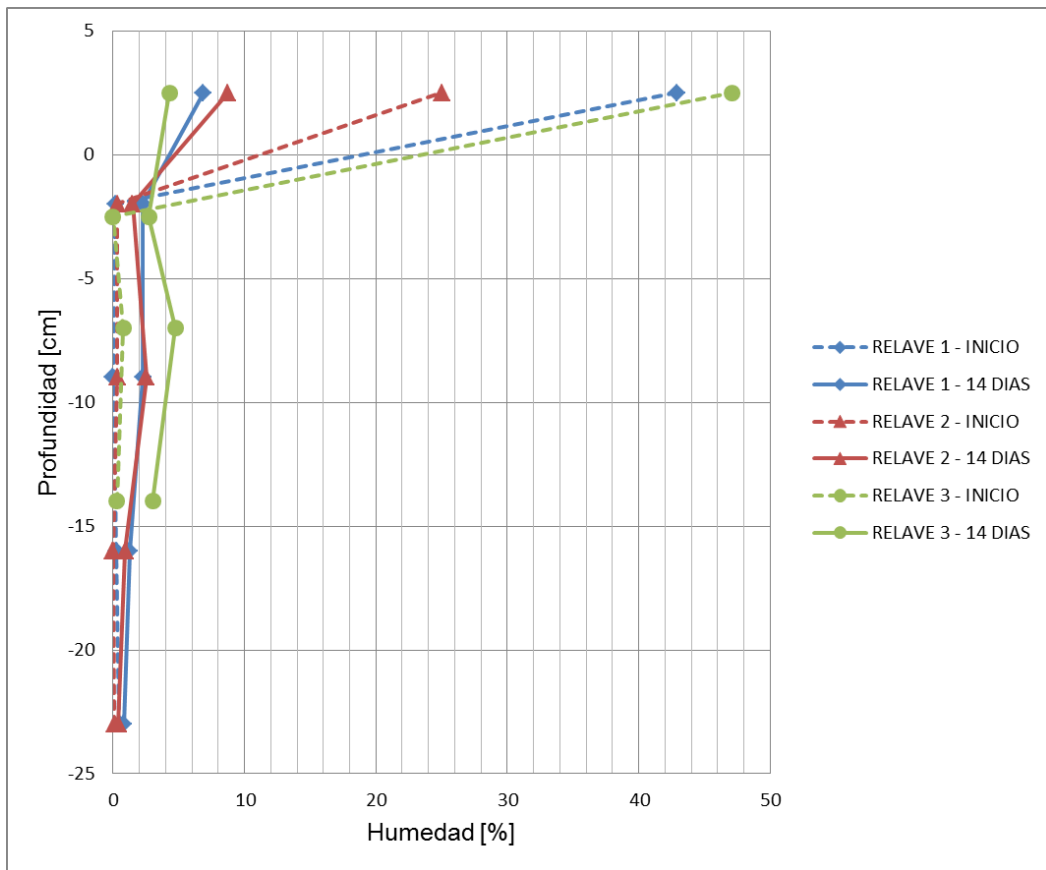


Figura 4.9: Perfiles de humedad al inicio y después de 14 días para el Suelo de Fundación 1 con los relaves R1, R2 y R3.

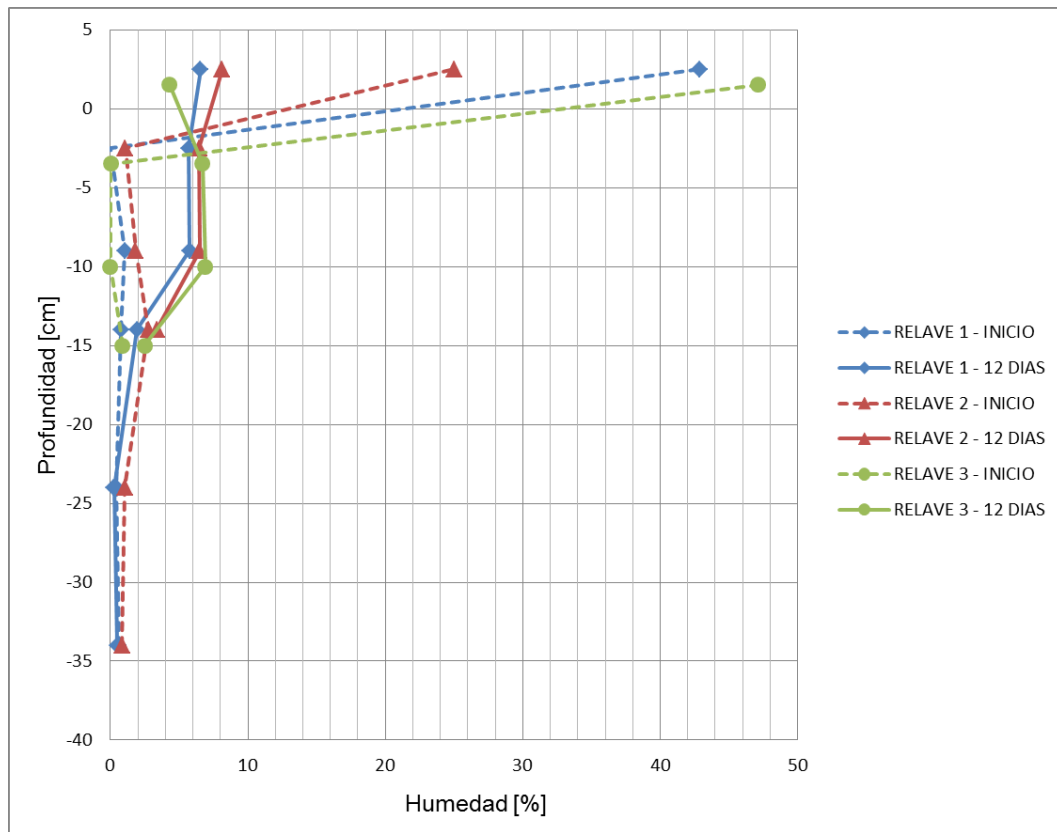


Figura 4.10: Perfiles de humedad al inicio y después de 12 días para el Suelo de Fundación 2 con los relaves R1, R2 y R3.

De los resultados obtenidos se puede observar lo siguiente:

- Los perfiles de humedad finales en el suelo de fundación debido a la depositación de los tres relaves son similares, lo que indicaría que la humedad final del suelo no depende de las propiedades de los relaves. Este fenómeno ocurre para los dos suelos de fundación utilizados, pese a que el suelo de fundación 1 al utilizar el relave 3 presenta una humedad levemente superior luego de 12 días respecto a los otros relaves.
- La humedad final del suelo no supera el 5% para el suelo de Fundación 1 y el 7% para el suelo de Fundación 2.
- Existe una disminución en la humedad de los relaves desde la depositación hasta los 12 días, que no tiene relación directa con la capacidad de retención de agua del relave, lo que se explica ya que la pérdida de humedad en los relaves es producida principalmente por evaporación y no por drenaje gravitacional. La capilaridad podría ser la variable que controla la humedad final del relave, ya que se observó que los relaves con mayor cantidad de finos terminan con una

humedad menor. Es posible que el relave con mayor capacidad de generar fuerzas capilares, provoque que el agua ascienda hacia la superficie permitiendo una mayor evaporación.

4.4.3 Efecto de cambio de suelo

En las Figuras 4.9 y 4.10 se observa que el suelo de fundación 2 luego de 12 días presenta mayor humedad que el suelo de fundación 1 para los tres relaves utilizados. Esto está en directa relación con la capacidad de retención de los suelos, ya que el suelo de fundación 1 tiene menor capacidad de retención que el suelo 2. Esto indicaría que la evaporación no tiene un efecto tan importante en el suelo como en los relaves. Por otra parte, la humedad final que presentan los relaves para ambos suelos de fundación son similares, lo que indicaría que la humedad final de los relaves no es afectada por el suelo de fundación y sería controlada más bien por la evaporación.

4.4.4 Efecto de la radiación

Para estudiar el efecto de la evaporación por radiación se realizaron dos ensayos de infiltración, los ensayos N°2 y N°8, donde la única diferencia entre ambos es que en uno se utilizó la lámpara de calor mientras que en el otro no fue utilizada.

Los ensayos se realizaron con el suelo de fundación 1 y relave 1, a la misma densidad y concentración de sólidos en peso para ambos ensayos.

La Figura 4.11 muestra los perfiles de humedad inicial y a 14 días para ambos ensayos. Sin la lámpara la humedad final del suelo es levemente mayor, pero hay una gran diferencia en la humedad final del relave, mientras con lámpara se alcanza una humedad de 7%, sin la lámpara la humedad solo baja a 17,5%. Este ensayo muestra nuevamente la importancia que tiene la evaporación en la humedad final del relave. También es posible observar que el efecto de evaporación no tiene la misma importancia para el suelo de fundación.

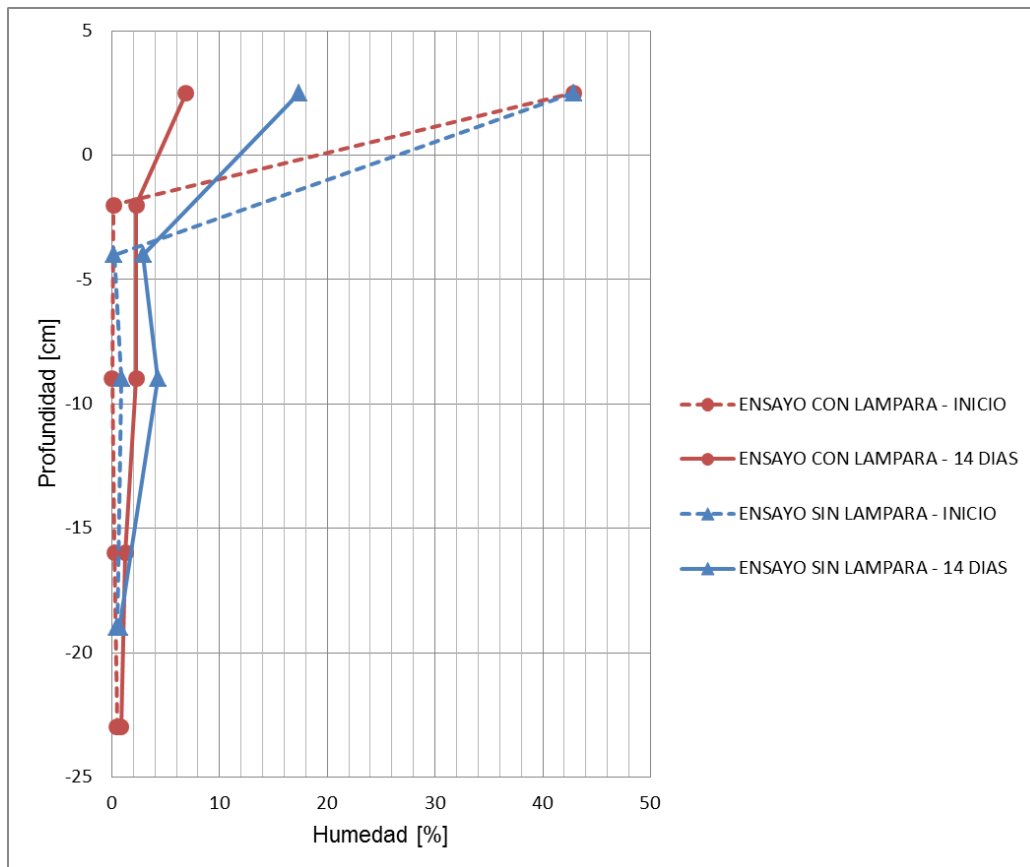


Figura 4.11: Perfiles de humedad al inicio y después de 14 días para comparar ensayos con y sin lámpara de calor.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, se implementó de forma exitosa un ensayo para medir los cambios de humedad producidos en el suelo de fundación luego de la depositación de una capa de relave. A partir de los resultados obtenidos con este ensayo es posible concluir lo siguiente:

- La infiltración en el suelo es producida principalmente inmediatamente después de la depositación del relave.
- La humedad final que presentan los relaves para ambos suelos de fundación son similares, lo que indicaría que la ésta no es afectada por el suelo de fundación y sería controlada más bien por la evaporación.
- La humedad final de los suelos de fundación para los tres relaves es similar, lo que indicaría que ésta depende de las propiedades intrínsecas del suelo de fundación y no de las características del relave. Estas propiedades intrínsecas pueden tener relación con la capacidad de retención del suelo. No obstante, la depositación de relaves frescos sobre capas de relaves que no han sido secados totalmente podría provocar gradientes hidráulicos mayores a los utilizados en esta investigación.
- La infiltración al suelo de fundación no se ve afectada de manera importante por el efecto de la radiación. No ocurre lo mismo en el relave, donde la humedad final se ve controlada principalmente por este efecto.
- La infiltración producida en los suelos de fundación no superó humedades de 7% y profundidades mayores a 25 cm.

5.2 Recomendaciones para futuras investigaciones

A modo de seguir avanzando en la comprensión del fenómeno de infiltración se recomienda considerar los siguientes aspectos en futuras investigaciones.

- Realizar mejoras en la instalación y en la ejecución del ensayo que permitan analizar el fenómeno cuantitativamente. Por ejemplo, pesar las columnas en el tiempo para medir la evaporación, colocar sensores de mayor precisión y ubicados a menor distancia que permitan estimar la cantidad de agua en profundidad, y utilizar tensiómetros y sensores de temperatura que ayuden a evaluar la dirección del flujo.
- Estudiar el efecto de la colocación de más capas de relave en la infiltración, considerando el efecto del tiempo de secado de las capas.
- Estudiar el efecto de la pendiente del terreno en la infiltración.
- Realizar un modelo matemático calibrado con los resultados obtenidos en esta investigación que permitan extrapolar el comportamiento observado en laboratorio al diseño de depósitos de relaves espesados.
- Estudiar si existe una relación entre la capilaridad del relave y la tasa de secado de este.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. DGA, 1987. Balance Hídrico de Chile.
2. Brixel, B. and Caldwell, J. (2011) Thirty years of tailings seepage history from tailings & mine waste. Proceedings Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver, Canada, 6-9 Noviembre.
3. Hsieh, P. A., Wingle, W., and Healy, R.W. (2000) VS2DI – A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media, U.S. Geological Survey.
4. Jewell, R. (2010) Ensuring the credibility of thickening technology, Paste 2010. Toronto, Canada. 3-6 Mayo.
5. Junqueira, F., Sanin, M., Sedwick, A. and Blum J. (2011) Assessment of water removal from oil sands tailings by evaporation and under-drainage, and the impact on tailings consolidation, Proceedings Tailings and Mine Waste 2011.
6. Moreno, J. and Palape, M. (2008) Prediction of the infiltration from thickened tailings to the natural ground, Paste 2008.
7. Operation Manual. RS232 Software for Hand Held Meter.
8. Robinsky, E. (1999) Thickened tailings disposal in the mining industry, Quebecor Printpak, 1999.
9. Simms, P.H., Gravinsky, M.W. and Zhan, G. (2005) Laboratory evaluation of evaporative drying from surface deposited thickened tailings at the Bulyanhulu gold mine, Canadian Geotechnical Conference, Saskatoon, Saskatchewan, Sept. 18-21 2005.
10. Simms, P., Grabinsky, M., and Guosheng, Z. (2007) Modelling evaporation of paste tailings from the Bulyanhulu Mine. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 44, pp. 1417-1432.

11. Simms, P., Dunmola, A., Fisseha, B. and Bryan, R. (2010) Generic modeling of desiccation for cyclic deposition of thickened tailings to maximize density and to minimize oxidation, Paste 2010.
12. Waterhouse, J. and Friday, R. (2000) To line or not to line – the effect of geometry on seepage rates from tailings storage facilities. Proceedings, 7th International Mine Water Association Congress.
13. Witteman, M. and Simms, P. (2010) Hydraulic response in cemented paste backfill during and after hydration. In Proceedings of the 13th International Conference on Paste and Thickened Tailings, Toronto, Ontario, 3-6 Mayo 2010, pp. 199-208.

7 ANEXOS

ANEXO A

CURVAS DE HUMEDAD VS TIEMPO

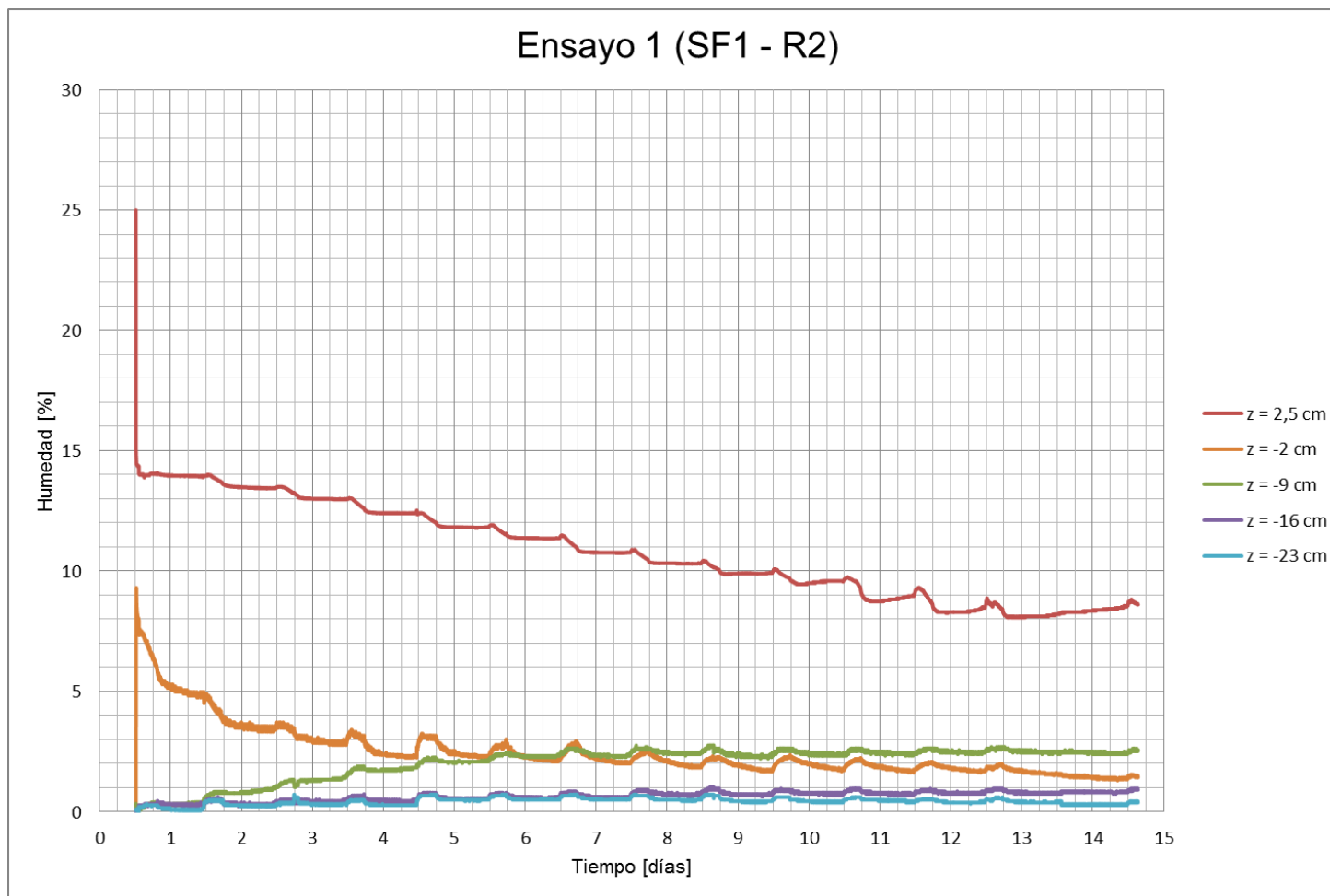


Figura N°1: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°1.

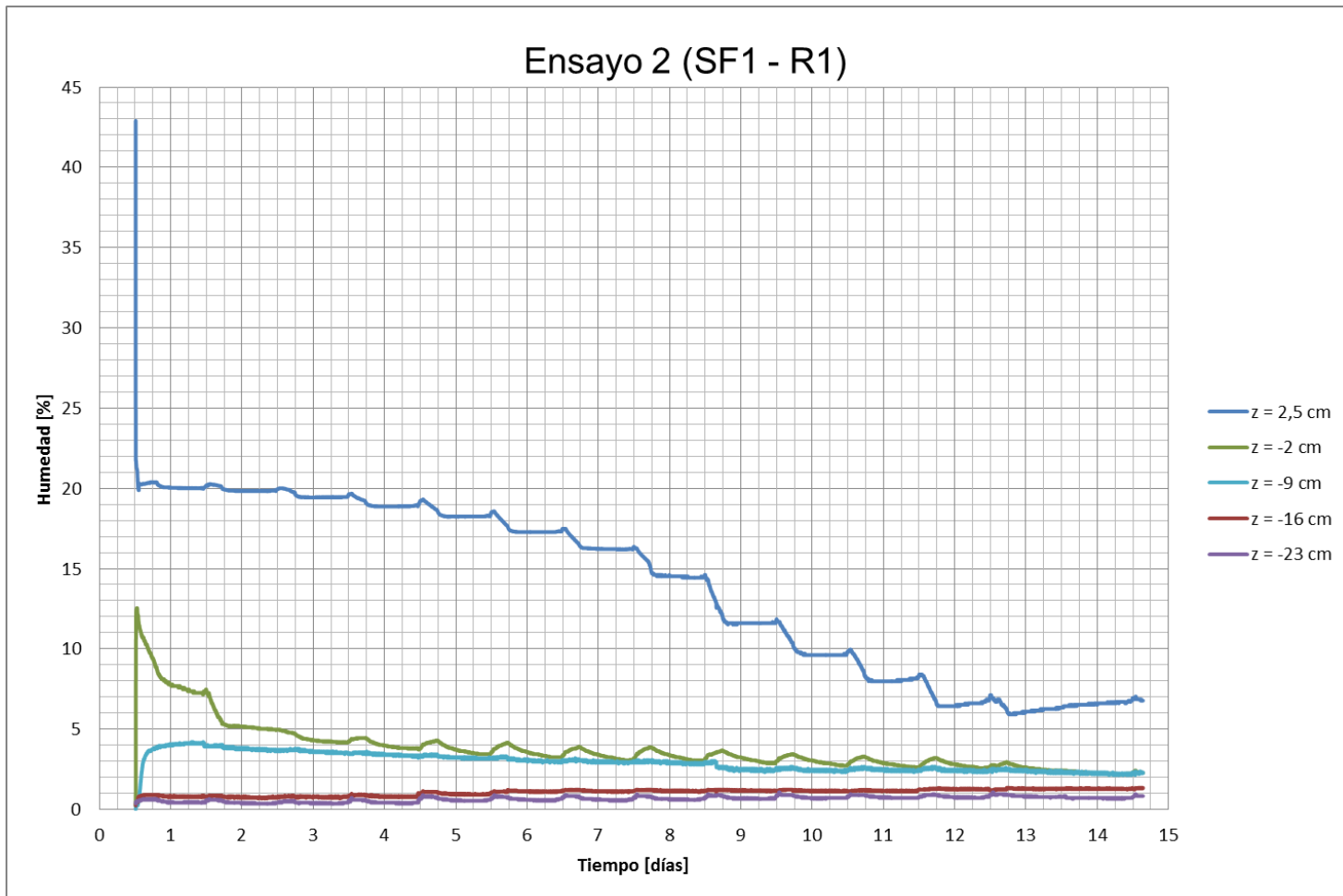


Figura N°2: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°2.

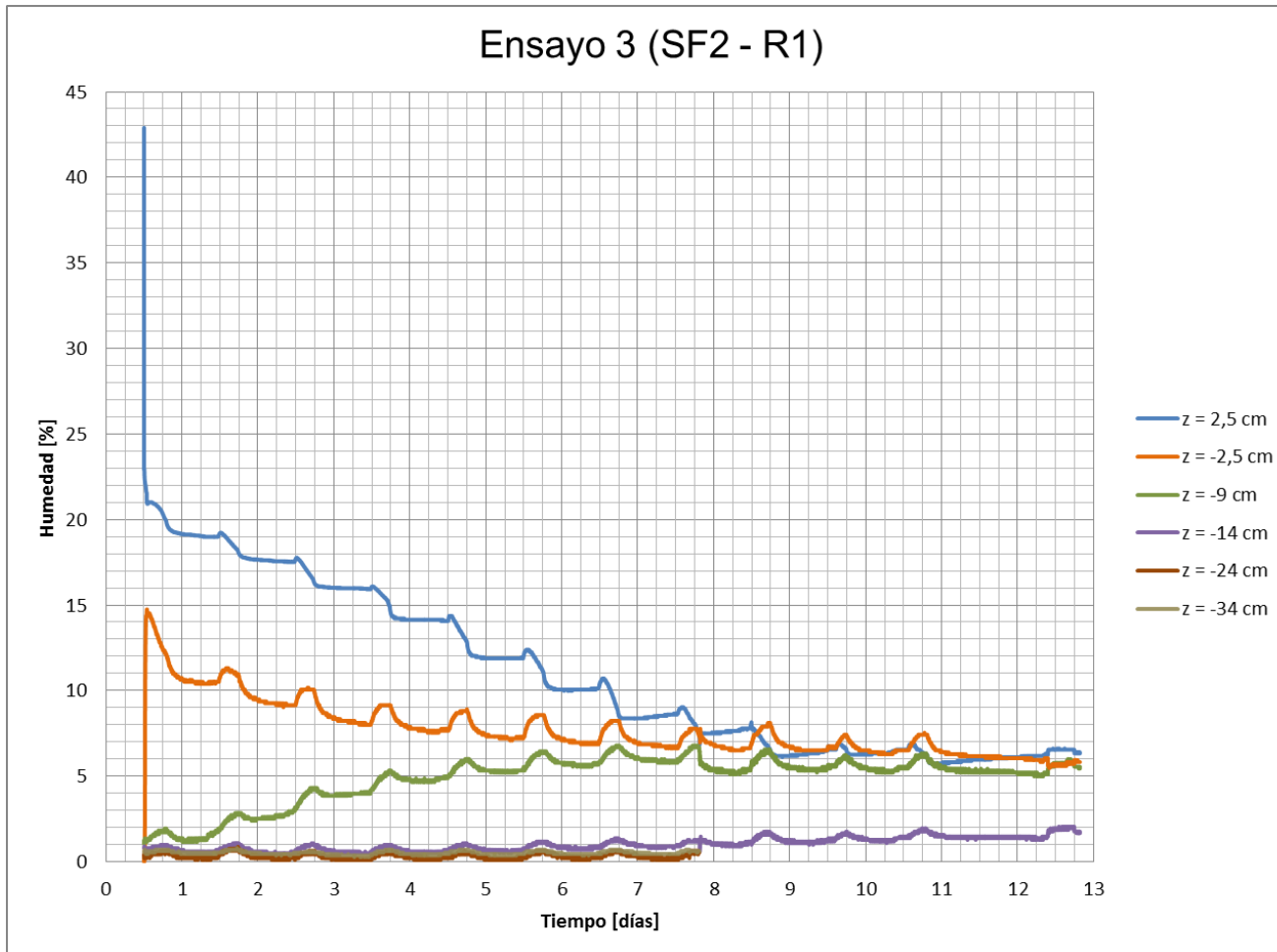


Figura N°3: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°3.

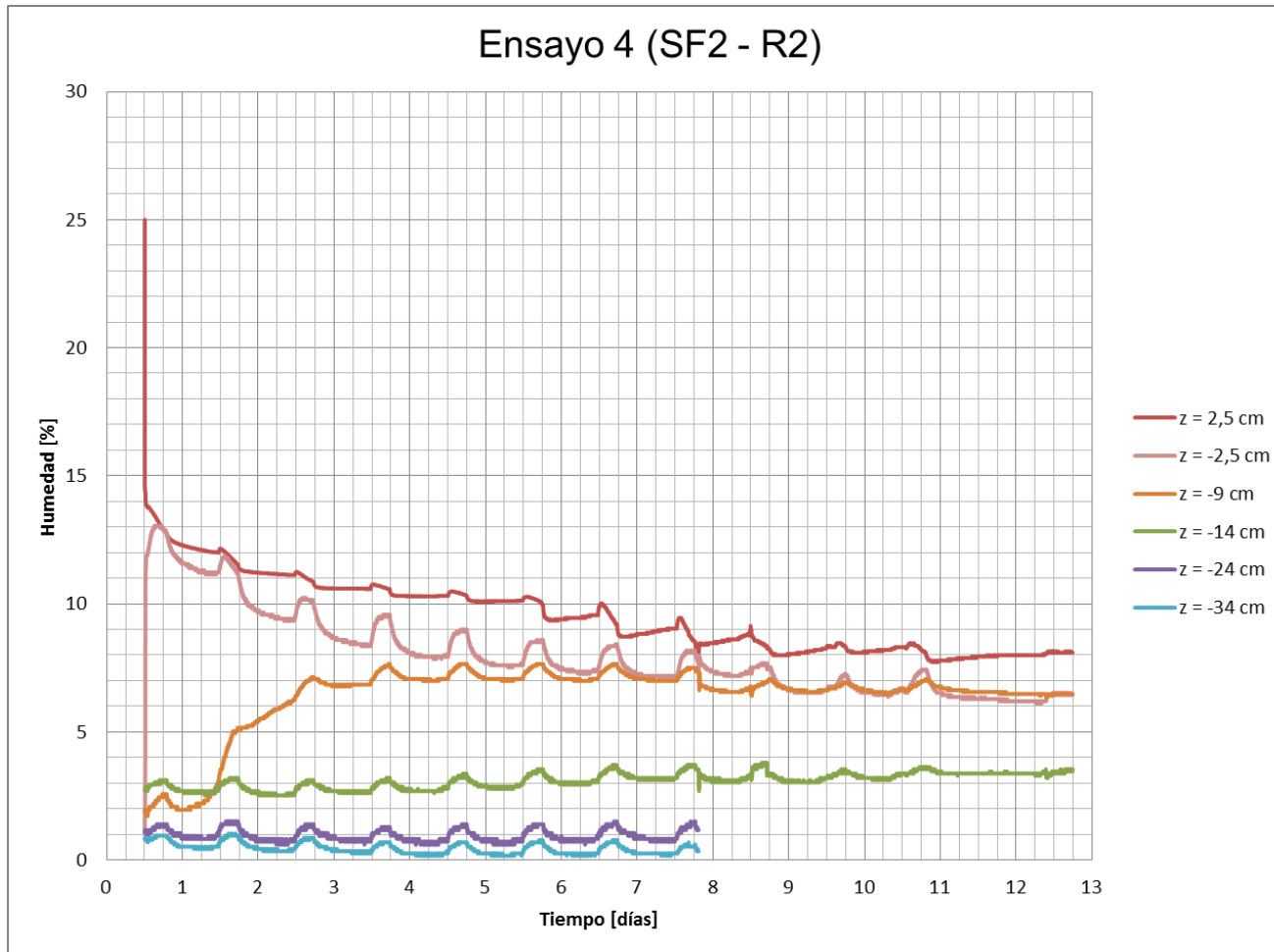


Figura N°4: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°4.

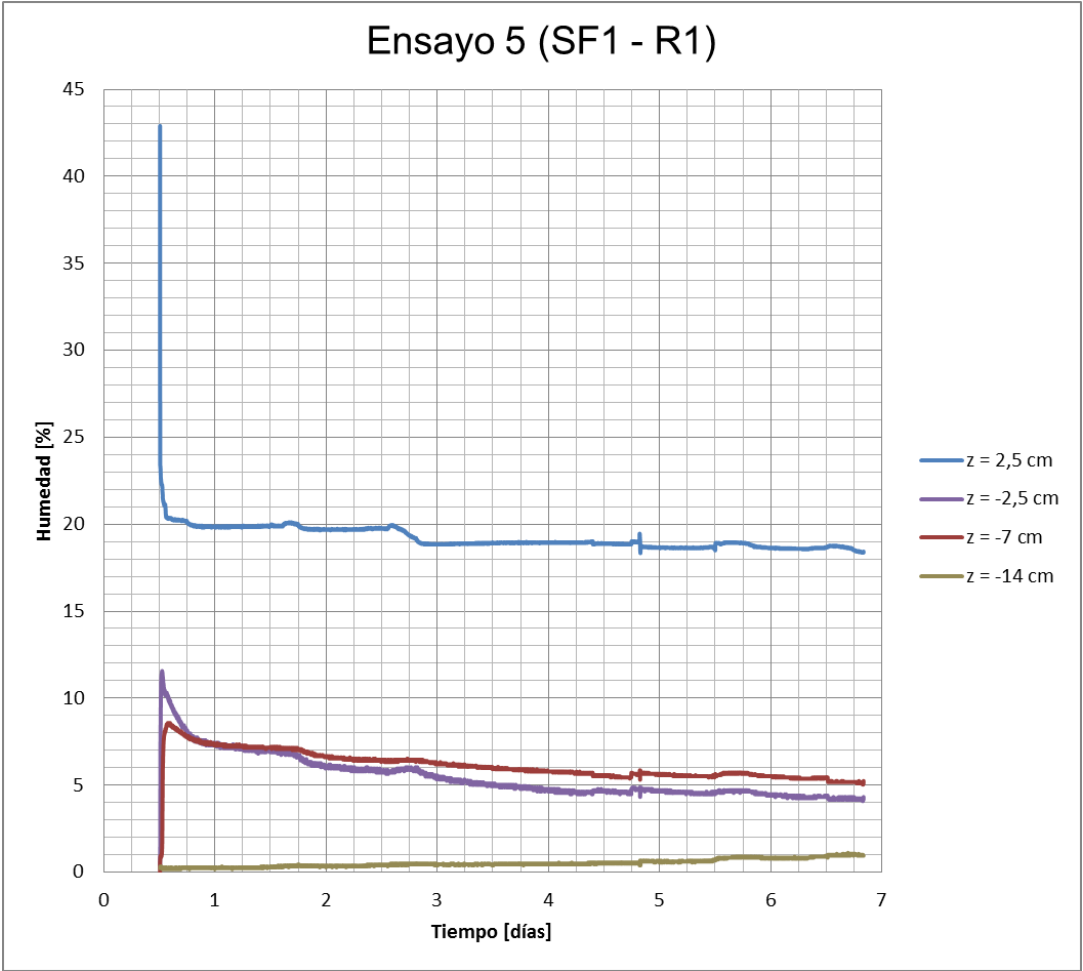


Figura N°5: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°5.

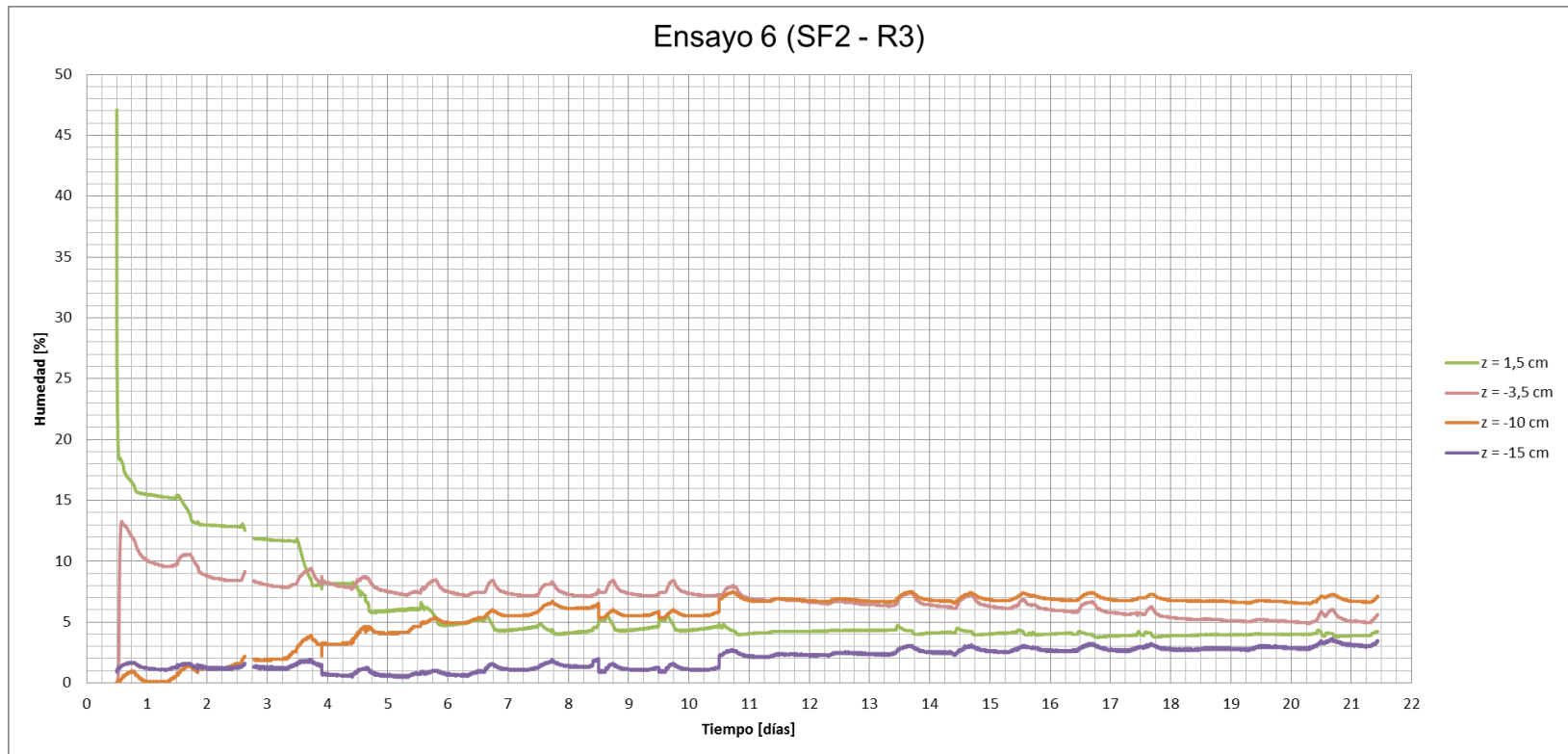


Figura N°6: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°6.

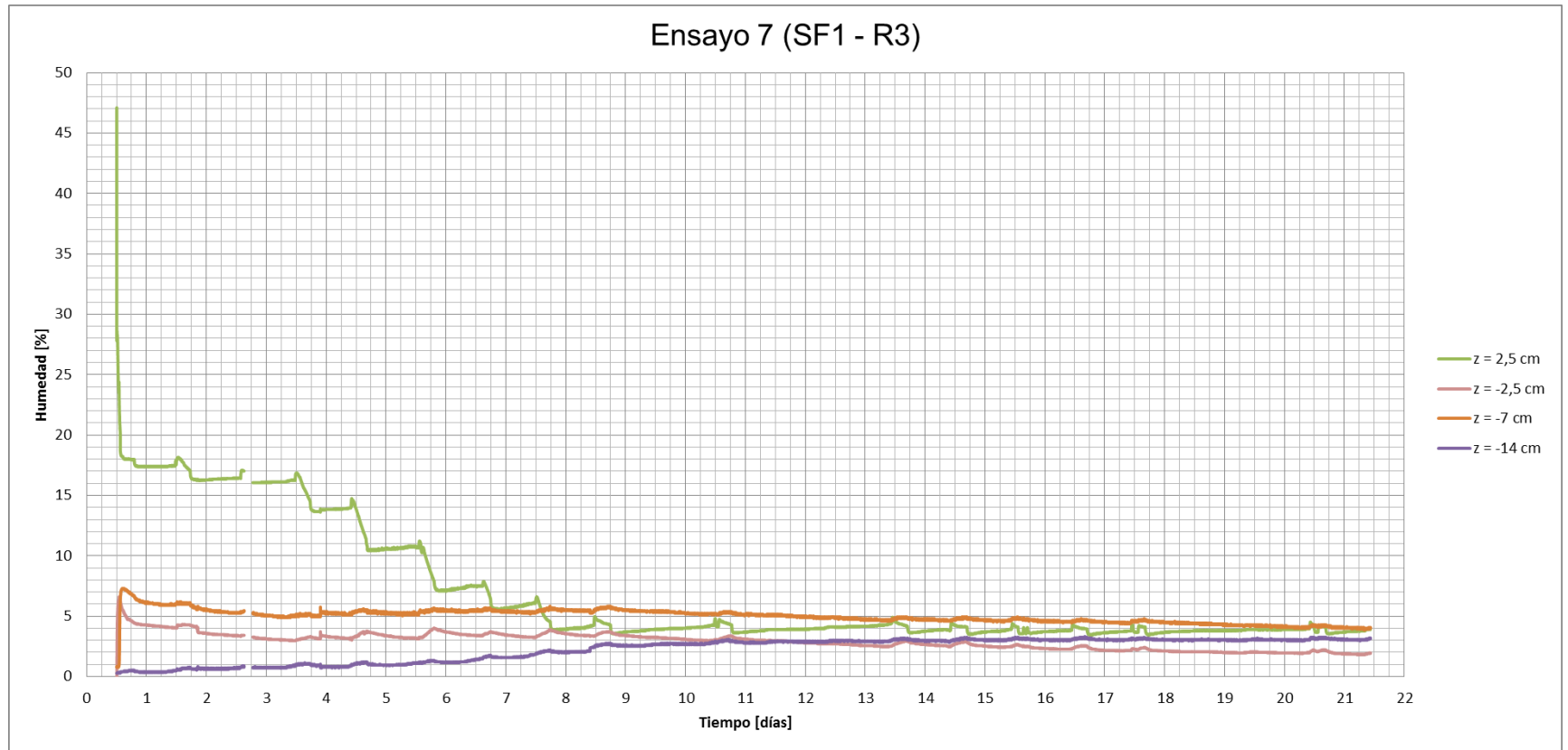


Figura N°7: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°7.

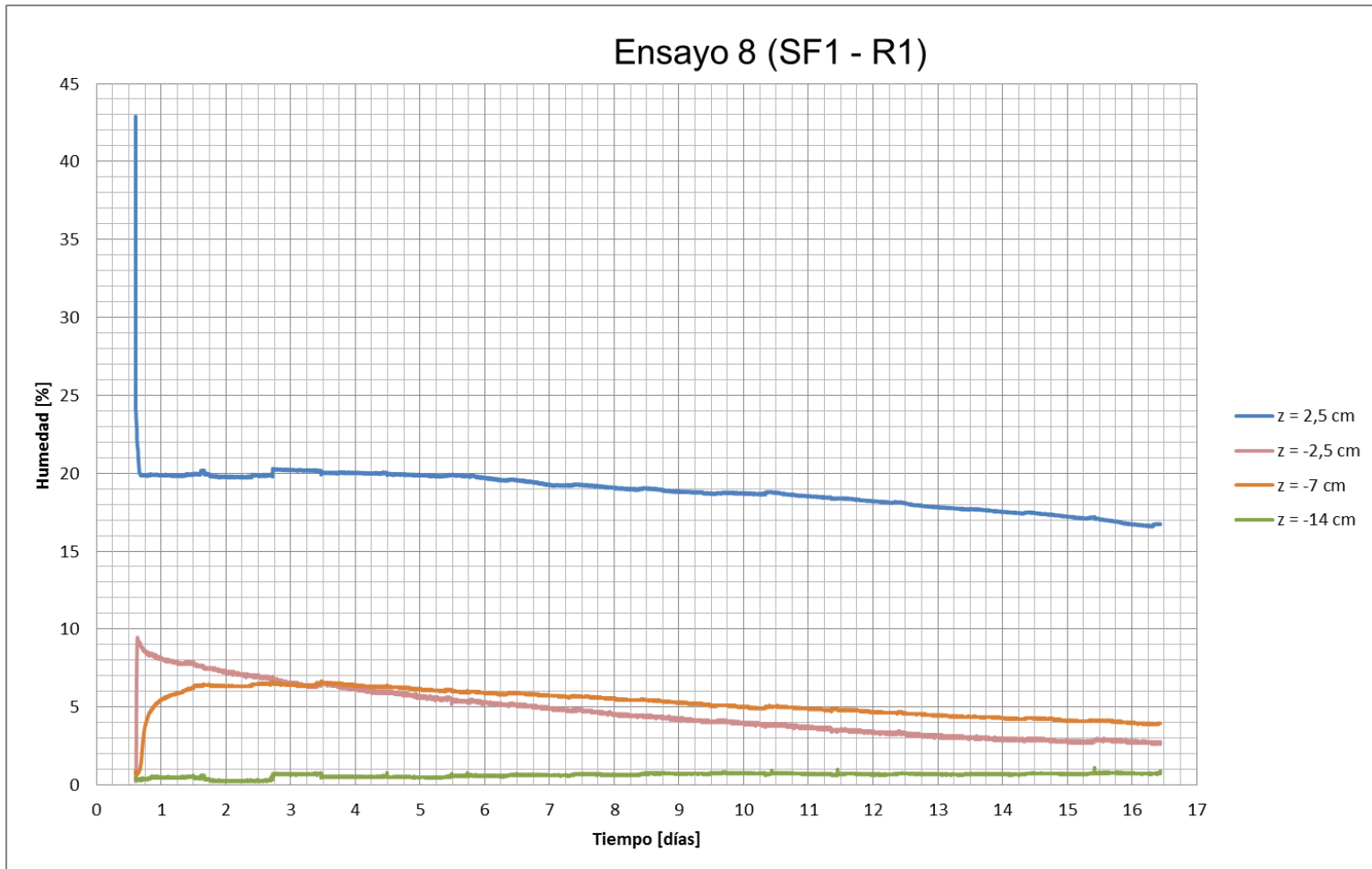


Figura N°8: Curvas de humedad vs tiempo de Ensayo N°8.

ANEXO B

PERFILES DE HUMEDAD INICIALES Y FINALES

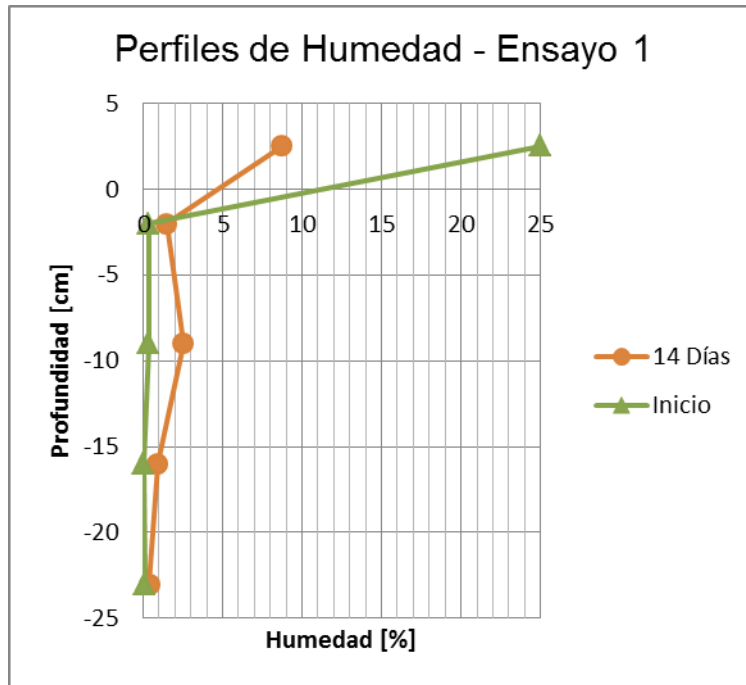


Figura N°1: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°1.

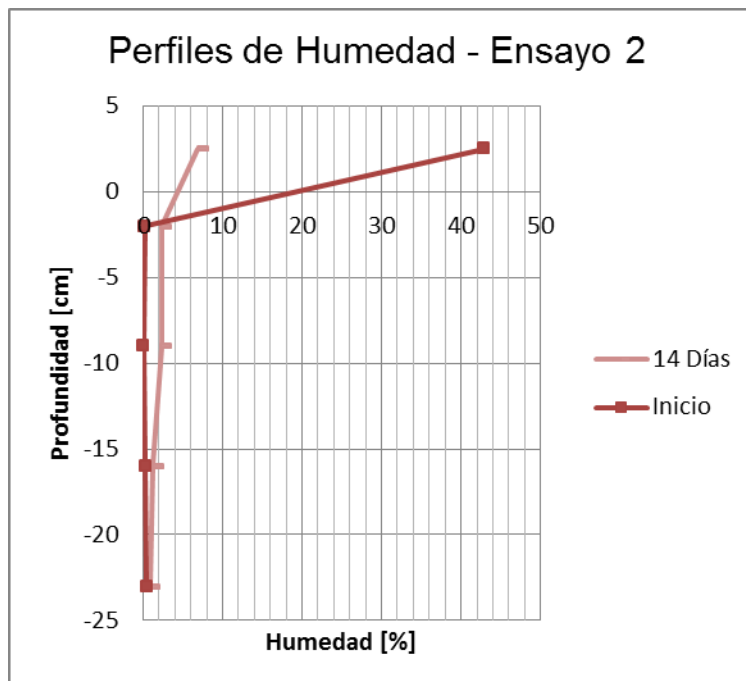


Figura N°2: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°2.

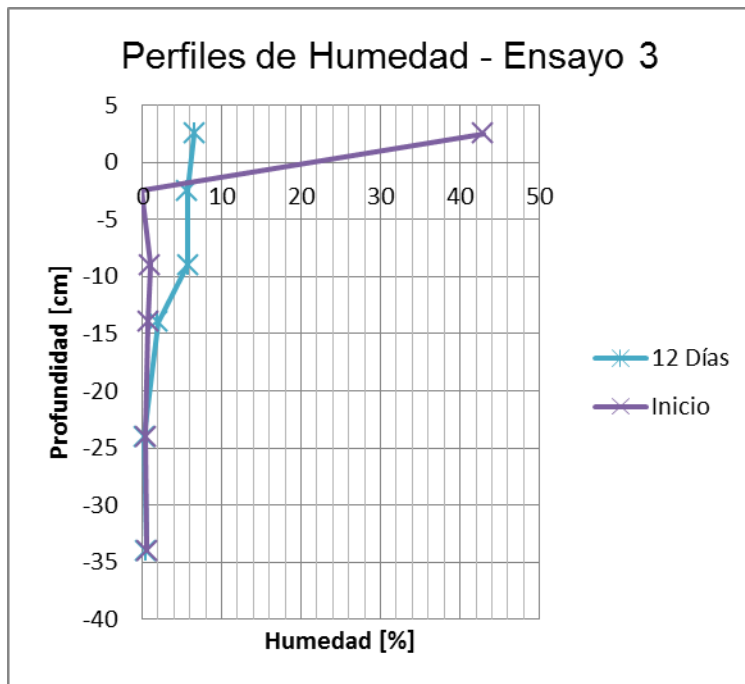


Figura N°3: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°3.

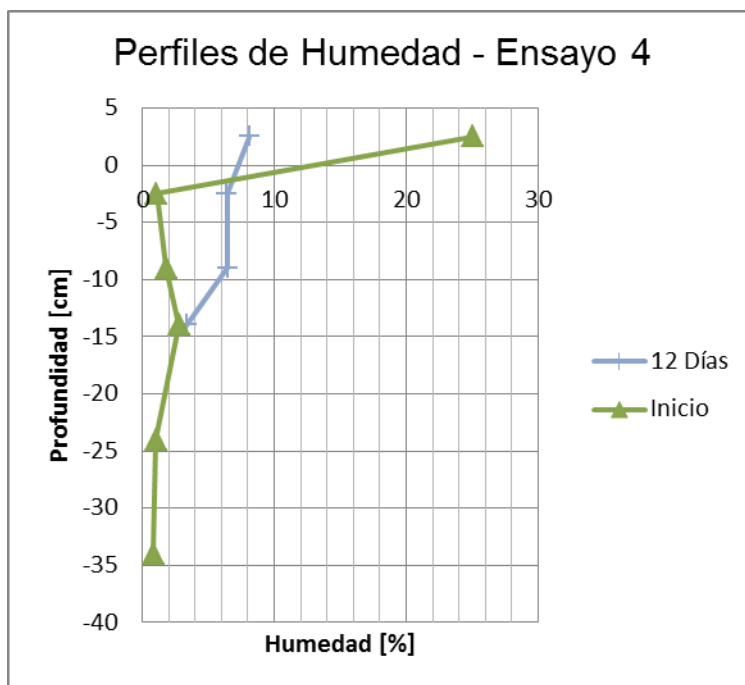


Figura N°4: Perfiles de humedad al inicio y final de N°4.

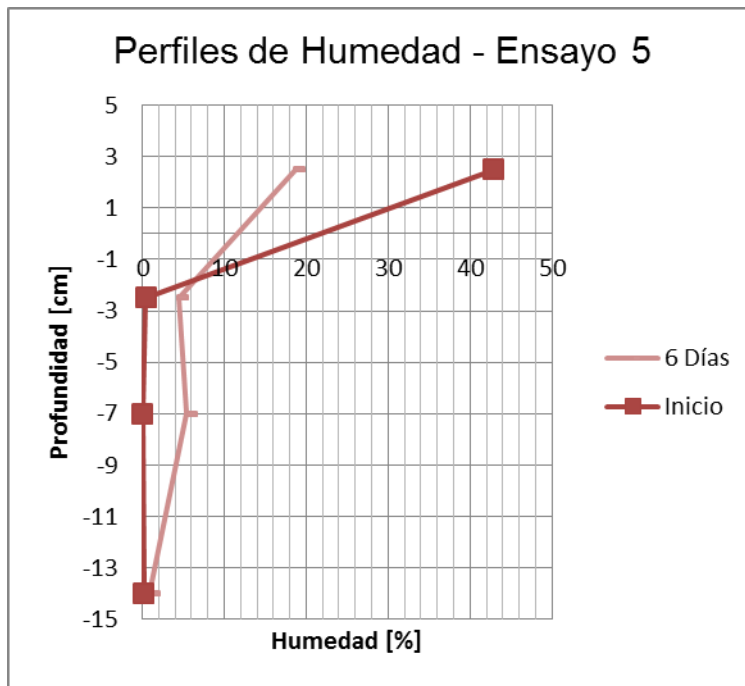


Figura N°5: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°5.

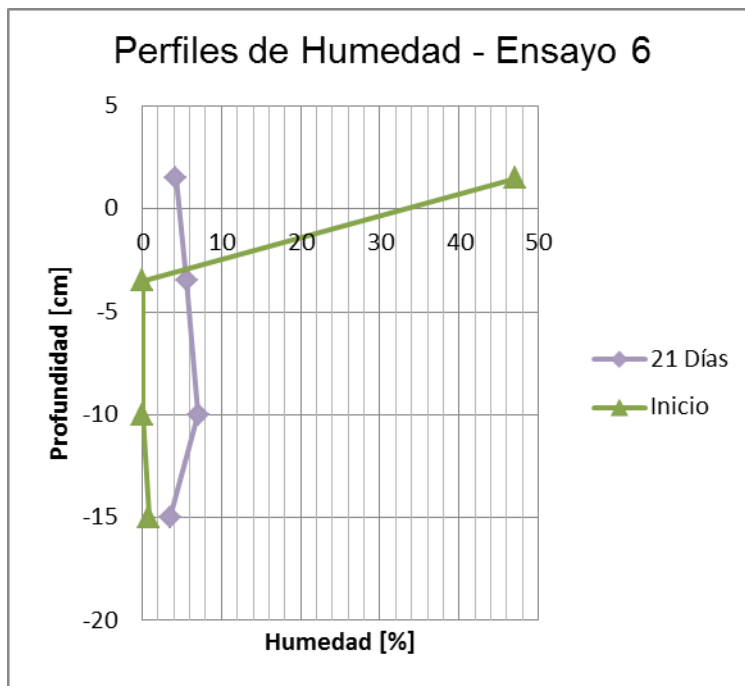


Figura N°6: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°6.

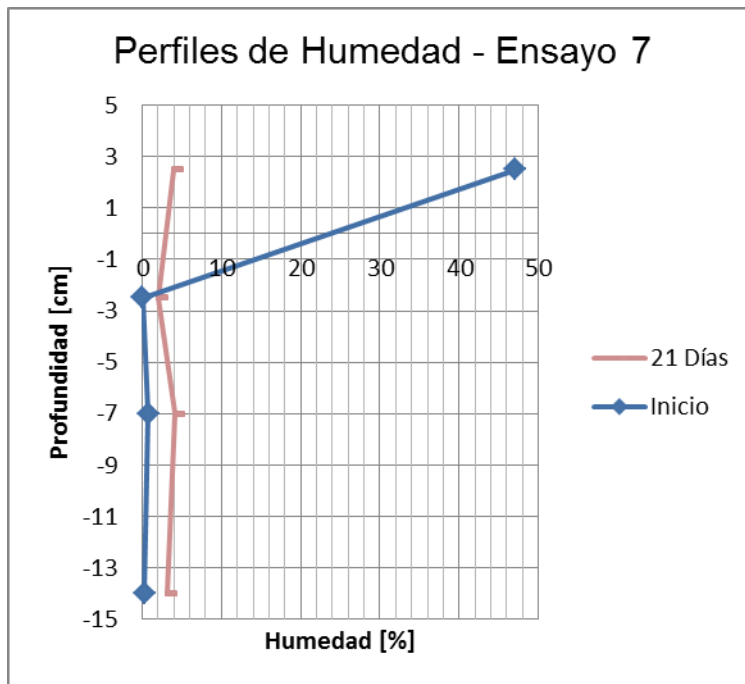


Figura N°7: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°7.

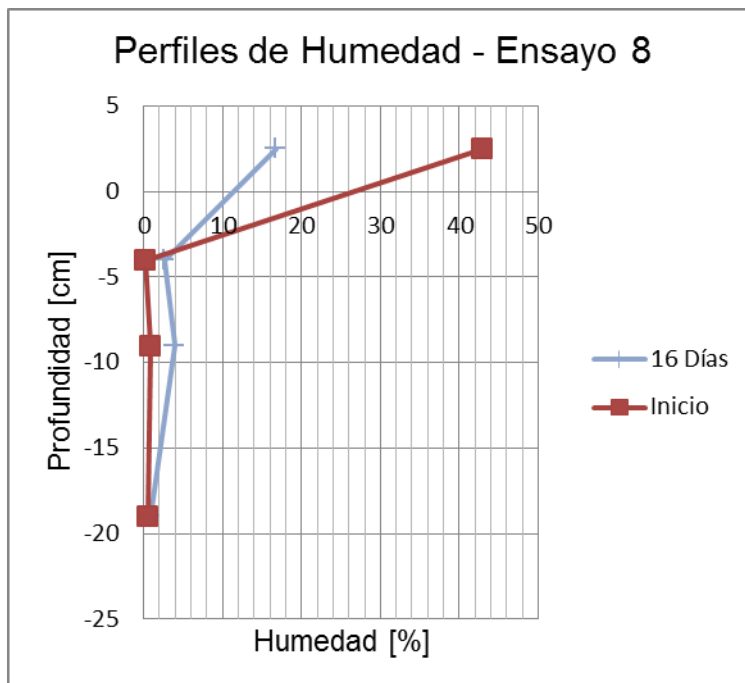


Figura N°8: Perfiles de humedad al inicio y final de Ensayo N°8.