



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

**ANÁLISIS DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE RELAVES ESPESADOS
DEPOSITADOS EN CAPAS DELGADAS CON CICLOS DE SECADO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FABIÁN ANÍBAL OLEA MELIÁN

PROFESOR GUÍA:
TOMÁS ERRÁZURIZ BLAU

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CÉSAR PASTÉN PUCHI
RODRIGO GUTIÉRREZ ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

ANÁLISIS DE LA DENSIDAD SUPERFICIAL DE RELAVES ESPESADOS DEPOSITADOS EN CAPAS DELGADAS CON CICLOS DE SECADO

El presente trabajo de título busca avanzar en el entendimiento del proceso de depositación de relaves espesados y la evolución de su densidad depositada, la cual tiene influencia en el comportamiento geotécnico posterior del depósito.

Se propone una metodología específica y estandarizada de muestreo en terreno y ensayos de laboratorio (granulometría, densidad, humedad y sedimentación) para estudiar el comportamiento de la densidad del relave depositado en Minera Centinela. Se diferencian dos procesos a estudiar en la depositación, el primero corresponde al cambio de la concentración de sólidos en el flujo del relave y su impacto sobre la formación de playas, donde domina el proceso de transporte de sedimento y la separación sólido-líquido durante el comportamiento hidráulico de la pulpa antes de convertirse en suelo depositado. El segundo corresponde a, una vez que la descarga activa en el sector cesa, la pulpa de relaves es un suelo sedimentado, en este punto domina la consolidación y secado por evaporación. Los dos procesos a estudiar influyen en la densidad del relave depositado y el resultado corresponde a una relación de densidad depositada como función de las propiedades físicas del relave, siendo estas, concentración en peso de sólidos, tiempo de descarga, tiempo de secado, clima y distancia de descarga, en base al muestreo in-situ, el cual también será un resultado que proviene de la metodología de muestreo.

Las mediciones en terreno muestran que existe una variación de la concentración en peso de sólidos de los relaves recién depositados en playas de hasta 15 puntos porcentuales según la distancia de la descarga, se propone un modelo para predecir esta variación basado en el efecto de la gravedad sobre el relave durante la depositación, en el cual se plantea que existe un fenómeno de mezcla y arrastre de las pulpas menos densas y la que proviene de la depositación, esta mezcla es arrastrada aguas abajo, produciendo una distribución de concentraciones de sólido y densidad en la distancia. El modelo propuesto permite explicar la concavidad de playas de relaves observadas y constituye una metodología para la estimación de la concavidad esperada para nuevos casos de estudio a través de un modelo de predicción de pendientes de la literatura. Para la fase de consolidación y secado del relave se propone un modelo que considera la sedimentación y la evaporación para un espesor de capa y una concentración dada, con el que se obtienen resultados acordes a los medidos en terreno para el relave depositado. Además, se entregan recomendaciones para el tiempo de consolidación y secado para obtener el límite de contracción y densidad objetivo.

The purpose of art is not the release of a momentary ejection of adrenaline but rather the gradual, lifelong construction of a state of wonder and serenity.

Glenn Gould

Agradecimientos

Me gustaría iniciar este documento agradeciendo a mi familia y el constante apoyo que me han brindado durante toda mi vida, especialmente a mis padres que siempre promovieron mis ideas, entregarme la libertad que necesitaba y a mi hermano por ayudarme a conectarme con mi yo de niño.

Agradecer a todas las personas con las cuales formé amistad en la universidad. Por esas tardes avanzando tareas o más echando la talla en Civil, por los carretes de los viernes y a veces de casi toda la semana cuando empezaba el semestre. Sin lugar a dudas, sin ustedes el paso por la universidad habría sido muy diferente, sin lugar a dudas es lo que más se extraña durante la pandemia.

Finalmente, agradezco a los miembros de la comisión y profesionales, Tomás Errázuris, Rodrigo Gutierrez, César Pastén, Erwin Cortés y Horacio Olavarría por su constante apoyo durante la realización de esta memoria. Especialmente a Tomás por su disposición, inagotable paciencia y enseñarme lo bello que es la geotecnia.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Depósito de relaves de Minera Centinela	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Metodología de la memoria	3
2. Marco teórico	5
2.1. Relaciones entre propiedades índice: C_p y densidad	5
2.1.1. Concentración en peso de sólidos C_p	5
2.2. Relaves espesados como tecnología	8
2.3. Sobre la metodología de depositación	10
2.4. Reología y pendientes	12
2.5. Sobre el proceso de consolidación y secado del relave	15
2.5.1. Sedimentación	15
2.5.2. Secado	15
2.5.2.1. Etapa 1 secado	16
2.5.2.2. Etapa 2 secado	16
2.5.3. Consolidación	16
2.6. Software CONDES0	18
2.7. Conclusiones sobre la revisión	19
3. Metodologías de muestreo	21
3.1. Motivación y condición en terreno	21
3.1.1. Estado del arte	22
3.1.1.1. Relave fresco	22
3.1.1.2. Relave en proceso de consolidación y secado	22
3.2. Metodología de muestreo desarrollada en este trabajo	23
3.2.1. Relave fresco, ‘trampa de relaves’	23
3.2.2. Relave en proceso de consolidación y secado	25
3.3. Calibración de trampa de relaves	26
4. Muestreo en terreno y resultados	30
4.1. Medición de relave fresco	30
4.1.1. Datos de planta	30
4.1.2. Metodología aplicada en terreno	31
4.1.3. Resultados C_p	32

4.1.4. Resultados granulometría	34
4.2. Relave en proceso de consolidación y secado	37
4.2.1. Resultados evolución de densidad en el tiempo	39
4.2.2. Resultados evolución de humedad en el tiempo	40
4.2.3. Conclusiones sobre la campaña	40
5. Sedimentación de relave y CONDES0	43
6. Modelo simplificado de secado y consolidación de relaves	48
6.0.0.1. Secado para capas más gruesas	51
6.0.1. Índice de vacíos y densidad	52
6.0.2. Saturación	53
6.0.3. Ciclos de secado	55
7. Depositación de relaves y variación de C_p	58
7.1. Depositación de relaves	58
7.2. Modelo de variación del C_p	61
7.3. Variación del yield stress y concavidad de playas	66
7.3.1. C_p inicial y concavidad de playas	68
8. Conclusiones y recomendaciones	72
8.1. Recomendaciones para la operación	74
8.2. Recomendaciones para futuros estudios	75
9. Bibliografía	76
Anexos	78
Anexo A. Datos de muestras C_p en la distancia	78
Anexo B. Datos de muestras granulometrías en la distancia	79
Anexo C. Ensayos de sedimentación	80
Anexo D. CONDES0	82
Anexo E. Perfiles de Centinela	84
Anexo F. Metodología para relaves frescos	86
Anexo G. Metodología para relave en proceso de consolidación y secado	89

Índice de Tablas

3.1.	Masas de sólido y agua utilizados.	27
3.2.	Resultados precisión trampa de relaves.	29
4.1.	Promedio de límites de Atterberg para relaves producidos en Centinela.	35
5.1.	Parámetros calibrados de CONDES0 para relave de Centinela.	47
6.1.	Tasa de liberación de agua $h = 6$ [cm], $C_p = 65\%$	49
7.1.	Sub-sectores de relave sedimentando.	64
7.2.	Simulación de playa de relaves depositado con C_p por niveles.	65
7.3.	C_p promedio por sector.	65
A.1.	Datos de C_p tomado a muestras en terreno en distancia y C_p en planta.	78
B.1.	Datos granulometrías muestras en terreno.	79
B.2.	Datos granulometrías en planta.	79

Índice de Ilustraciones

1.1.	Ubicación de Minera Centinela y DRE, imágenes obtenidas de Google Earth. .	1
2.1.	Representación gráfica de la concentración en peso de sólidos. Elaboración propia.	5
2.2.	Parámetro de estado y curvas de consolidación densa y seca.	7
2.3.	Espesador de relaves del tipo DCT (Deep Cone Technology). Minera Centinela.	8
2.4.	Diferencias de pendiente y almacenamiento de un relave convencional y espesado (Bazán, 2020).	9
2.5.	Capacidad del depósito según pendiente de depositación y tiempo de llenado. Documento de HATCH para Minera Centinela	10
2.6.	Depositación de relaves espesados (M.P.A. Williams, 2010).	11
2.7.	Depositación de relaves espesados, canalización y formación de playa.	11
2.8.	Formulación fluido de Bingham.	12
2.9.	Relación del C_p y τ_y de Minera Centinela.	13
2.10.	Sedimentación de pulpa de relaves.	15
2.11.	Variables que afectan al secado de un relave recién depositado (Modificado desde Simms et al., 2007).	17
2.12.	Relación entre índice de vacíos, saturación, resistencia y difusión de oxígeno (Modificado desde Simms et al., 2007).	18
3.1.	Condición a muestrear.	21
3.2.	Capas de relave depositado.	22
3.3.	A la izquierda, agua negra que se debe evitar muestrear.	23
3.4.	Muestreo de relave fresco, se indica que el muestreo debe ser realizado desde un pretil cercano por motivos de seguridad.	24
3.5.	Izquierda: Diagrama del muestreador, Derecha: Muestreador.	24
3.6.	Izquierda: Muestreador plano, Derecha: Muestreador levantado como cubeta. .	25
3.7.	Izquierda: Sector a muestrear, Derecha: Lámina diferenciadora. Realización propia.	25
3.8.	Tubo shelby introducido con muestra recuperada y medición de altura.	26
3.9.	Muestreador situado de forma plana.	27
3.10.	Relave de C_p conocido cubre muestreador.	28
3.11.	Muestreador con relave levantado como cubeta.	28
3.12.	Muestra pesada y secada.	29
4.1.	Ubicación del muestreador en terreno.	31
4.2.	Muestreador cubierto por relave en terreno y proceso de obtención de la muestra.	31
4.3.	Recuperación de muestra y pesaje.	32
4.4.	C_p de las muestras tomadas en la distancia.	32
4.5.	Variación del C_p según la distancia.	33
4.6.	Variación del C_p según C_p de planta.	33
4.7.	Densidad seca según distancia de depositación.	34
4.8.	Granulometrías de relaves en planta.	34

4.9.	Granulometrías de muestras de relave tomadas en terreno.	35
4.10.	Granulometrías en planta y terreno.	35
4.11.	Porcentaje de finos de muestras tomadas en terreno y respectivamente en planta.	36
4.12.	Diferencia de porcentaje de finos según la distancia.	36
4.13.	Capa previa y fresca de relave.	37
4.14.	Ensayo de cono de arena a la capa previa en día 1.	37
4.15.	Izquierda: Muestreador situado a la espera de ser cubierto, Derecha: Muestreador cubierto con relave fresco.	38
4.16.	Izquierda: Tubo introducido en la capa, Derecha: Medida de altura de capa.	38
4.17.	Izquierda: Lámina situada en capa previa para realizar cono de arena, Derecha: Cono de arena.	39
4.18.	Densidad seca del relave fresco depositado y capa previa según el tiempo.	39
4.19.	Densidad húmeda del relave fresco depositado y capa previa según el tiempo.	40
4.20.	Humedad del relave fresco depositado y capa previa según los días.	40
5.1.	Izquierda: Montaje experimental, Derecha: Vaso precipitado con pulpa de relave.	44
5.2.	Ensayo de sedimentación de 10 [cm] para diferentes concentraciones de sólido.	45
5.3.	Experimental vs CONDES0 $C_p = 65\%$	45
5.4.	Distribución de índice de vacíos en la altura.	46
5.5.	Distribución C_p en altura.	46
6.1.	Liberación de agua sedimentación vs evaporación, $h = 6$ [cm], $C_p = 65\%$	50
6.2.	Humedad vs tiempo depositado del relave, $h = 6$ [cm], $C_p = 65\%$	50
6.3.	Humedad vs tiempo depositado del relave, $h = 10$ [cm], $C_p = 65\%$	51
6.4.	Humedad vs tiempo depositado del relave, $h = 15$ [cm], $C_p = 65\%$	52
6.5.	Modelo evolución del índice de vacíos del relave depositado.	53
6.6.	Modelo evolución de la densidad seca del relave depositado.	53
6.7.	Curva de secado hasta 80% de saturación.	55
6.8.	Ensayos realizados a las muestras MOSTAP tomadas por Golder en el depósito de relaves de Minera Centinela. Humedad, Saturación, Índice de vacíos, Densidad seca y Esfuerzo vertical en profundidad.	56
6.9.	Trayectorias obtenidas de los ensayos triaxiales CID y CIU en la campaña geotécnica de Golder en el depósito de relaves de MC.	57
7.1.	Playa inactiva.	58
7.2.	Playa activa, relave escurriendo.	59
7.3.	Transporte de relaves y depositación.	59
7.4.	Relave continua escurriendo.	59
7.5.	Relave cubre el kilómetro.	60
7.6.	Relave libera agua.	60
7.7.	Nueva capa de relave es depositada.	60
7.8.	Ondas de relave en terreno.	62
7.9.	Sectores de la playa sedimentando.	62
7.10.	Sectores sedimentando y sub-tramos.	63
7.11.	Modelos de distribución de C_p y datos de terreno.	65
7.12.	τ_y según distancia del modelo y variación de C_p	67
7.13.	Perfil 1 de Centinela y modelo calibrado.	68
7.14.	Perfil 2 de Centinela y modelo calibrado.	68
7.15.	C_p en la distancia desde la descarga para C_p inicial 67%.	69
7.16.	τ_y en la distancia para C_p inicial 67%.	69

7.17.	Concavidad, variación de la pendiente en la distancia.	70
C.1.	Ensayo de sedimentación de 3 [cm] para diferentes concentraciones de sólido. .	80
C.2.	Ensayo de sedimentación de 5 [cm] para diferentes concentraciones de sólido. .	81
D.1.	Experimental vs CONDES0 $C_p = 59\%$	82
D.2.	Experimental vs CONDES0 $C_p = 62\%$	83
D.3.	Experimental vs CONDES0 $C_p = 67\%$	83
E.1.	Perfil 1 de Centinela.	84
E.2.	Perfil 2 de Centinela.	85
F.1.	Ejemplo de momento para muestrear.	86
F.2.	Ejemplo de registro de masa.	87
F.3.	Ejemplo de relave seco.	88
G.1.	Excavación en la zona donde se muestreará relave	89
G.2.	Lámina diferenciadora de capas de relave.	90
G.3.	Cilindro y varilla introducida en la capa de relave.	90
G.4.	Medida de altura de capa con brocheta y huincha.	91
G.5.	Pastilla de relave con muestra.	91

Capítulo 1

Introducción

1.1. Depósito de relaves de Minera Centinela

El depósito de relaves de Minera Centinela, se encuentra en la II Región de Antofagasta, 60 km al suroeste de la ciudad de Calama, a una elevación promedio de alrededor de 2200 m s.n.m (figura 1.1).



Figura 1.1: Ubicación de Minera Centinela y DRE, imágenes obtenidas de Google Earth.

El depósito de relaves corresponde a uno del tipo espesado (DRE), tiene una extensión de 1710 hectáreas y una capacidad de 750 [Mton], teniendo una producción de alrededor de 100

[kton] diarias, con una concentración en peso de sólidos C_p promedio de 65 %, diariamente variando entre 63 % - 67 %. Debido al alto contenido de sólidos, el diseño del depósito se realizó considerando una pendiente de depositación del 4 %. En la práctica, el relave obtenido no se comportó como se esperaba, ya que playas formadas no superaban la pendiente del 0.5 %. La primera mejora fue implementar un sistema de descarga utilizando peinetas, permitiendo aumentar las pendientes hasta un 2 %, además, se tomaron medidas de contingencia, construyendo muros interiores y pretiles para tener una depositación controlada en el depósito, así, las áreas a inundar son reducidas, aumentando la pendiente por sector y por lo tanto, globalmente.

Para Minera Centinela, la diferencia de pendientes no sólo significó la construcción de estructuras interiores en el depósito sino también de muros de contención en el depósito, los cuales ascendieron a 230 millones de dólares.

A largo plazo, se espera no depender de estas estructuras interiores, utilizando un sistema de depositación de peinetas y obteniendo la pendiente de 4 % global como inicialmente fue diseñada. La experiencia indica que la utilización de peinetas facilita la depositación con pendiente, pues al tener una mayor cantidad de spigots, se reduce el caudal individual de cada una, obteniendo el régimen laminar requerido para favorecer la formación de mayores pendientes de depositación.

1.2. Motivación

La presente memoria busca avanzar en el entendimiento del comportamiento geotécnico del relave espesado depositado, lo cual es central para diseñar de forma segura y prevenir fallas catastróficas, optimizando el diseño y la operación del depósito de relaves.

La primera variable de relevancia para un relave espesado corresponde a la concentración en peso de sólidos, la cual se mide con balanza Marcy o con ensayo de humedad:

$$C_p[\%] = \frac{W_s}{W_s + W_w} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Con:

- C_p [%]: Concentración en peso de sólidos
- W_s [gr]: Masa de sólidos
- W_w [gr]: Masa de agua

La depositación de relaves se enmarca en el ámbito del manejo de los desechos mineros, el cual se debe desarrollar bajo altos estándares de seguridad, cuidado del medio ambiente y eficiencia.

Actualmente, para cumplir estos altos estándares se evalúan nuevas tecnologías de depositación de relaves, como son los relaves de alto espesamiento (> 65 % de concentración de sólidos en peso, C_p). Minera Centinela (MC) es pionera a nivel mundial en este uso de tecnologías para altas producciones.

El espesamiento de relaves, como su nombre lo indica, implica el proceso de deshidratación de la pulpa de relaves que contienen bajo porcentaje de sólido (Fourie, 2003), con lo anterior, es posible recuperar un gran porcentaje del agua utilizada en el proceso productivo del cobre. Es sabido que el uso sustentable de agua en la industria minera cada vez adquiere mayor relevancia (Welch, 2003) y la tecnología de espesamiento de relaves responde de una manera satisfactoria a las nuevas exigencias de la industria, para la recirculación de aguas y su aprovechamiento.

Finalmente, una de las principales variables que describen el comportamiento geotécnico de cualquier suelo (y en particular el de relaves), corresponde al parámetro de estado (Jefferies and Been, 2016), el cual queda definido por la densidad a la cual se encuentra el suelo, variable a la cual se atañe la presente memoria según el estado inicial de depositación del relave.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es estudiar la evolución de la densidad del relave depositado mientras ocurre el proceso de la descarga y durante el posterior secado de la capa superficial recién depositada en Minera Centinela en función del nivel de espesamiento en la descarga (C_p), duración de la descarga, tiempo de secado por sector y distancia de depositación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología de muestreo para relaves espesados, tanto para el momento de su depositación (playas) como para tiempos posteriores (etapa de secado).
- Correlacionar la densidad depositada medida mediante el C_p durante el proceso de descarga activa, considerando las propiedades físicas (G_s , % finos, ancho de capa) y las variables operativas como el tiempo de descarga, C_p de descarga y distancia a la descarga.
- Medir el secado del relave posterior a su depositación y proponer un modelo.
- Realizar posibles recomendaciones aplicables a la operación de los relaves para lograr densidades objetivo.
- En base a la variación de C_p , estudiar la variación del yield stress y proponer un modelo para evaluar la concavidad de las playas de relave.

1.4. Metodología de la memoria

A continuación se enumeran los capítulos de este trabajo y un resumen del contenido de cada uno de ellos.

Capítulo 2

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica sobre la memoria. Se busca recopilar información sobre relaves espesados y establecer una hipótesis en torno al proceso de consolidación y secado del relave y cómo afecta su estado inicial de depositación con respecto al desarrollo de la resistencia del mismo y su respuesta frente a nuevas sollicitaciones.

Capítulo 3

En este capítulo se estudiarán las condiciones de relave a muestrear junto con las metodologías propuestas para aplicar en terreno y obtener los datos necesarios para esta memoria.

Capítulo 4

En este capítulo se abordará el muestreo en terreno y los resultados obtenidos para los ensayos de C_p , granulometría y secado de la capa en terreno realizados.

Capítulo 5

Se estudia la sedimentación de relaves y se establece un modelo sobre ella utilizando el software CONDES0, calibrando sus parámetros con ensayos experimentales.

Capítulo 6

Se analiza el secado y la consolidación del relave mediante un modelo simplificado que considera la sedimentación y la evaporación para obtener la humedad y la densidad en el tiempo. Con este modelo y el análisis de las propiedades geomecánicas del relave se establecen criterios para los ciclos de secado a aplicar al relave para obtener densidades objetivo.

Capítulo 7

A partir de los resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5, se propone un modelo de variación del C_p en la distancia. Además, mediante un modelo de estimación de pendientes, se comparan las pendientes obtenidas mediante el modelo de variación de C_p y las de Centinela. Finalmente, se estudia la concavidad en la formación de pendientes y el impacto del C_p inicial sobre la misma.

Capítulo 8

Se presentan las principales conclusiones sobre el trabajo realizado además de recomendaciones para la operación y para posibles futuros estudios.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Relaciones entre propiedades índice: C_p y densidad

2.1.1. Concentración en peso de sólidos C_p

En esta memoria se realizarán constantes referencias al C_p y su definición. El C_p se define como la concentración en peso de sólidos y queda descrita por la razón entre el peso seco de sólidos y el peso total de la pulpa de relave, teniendo en cuenta que el peso total de la pulpa corresponde a la suma del peso seco de sólidos y el peso de agua, gráficamente:

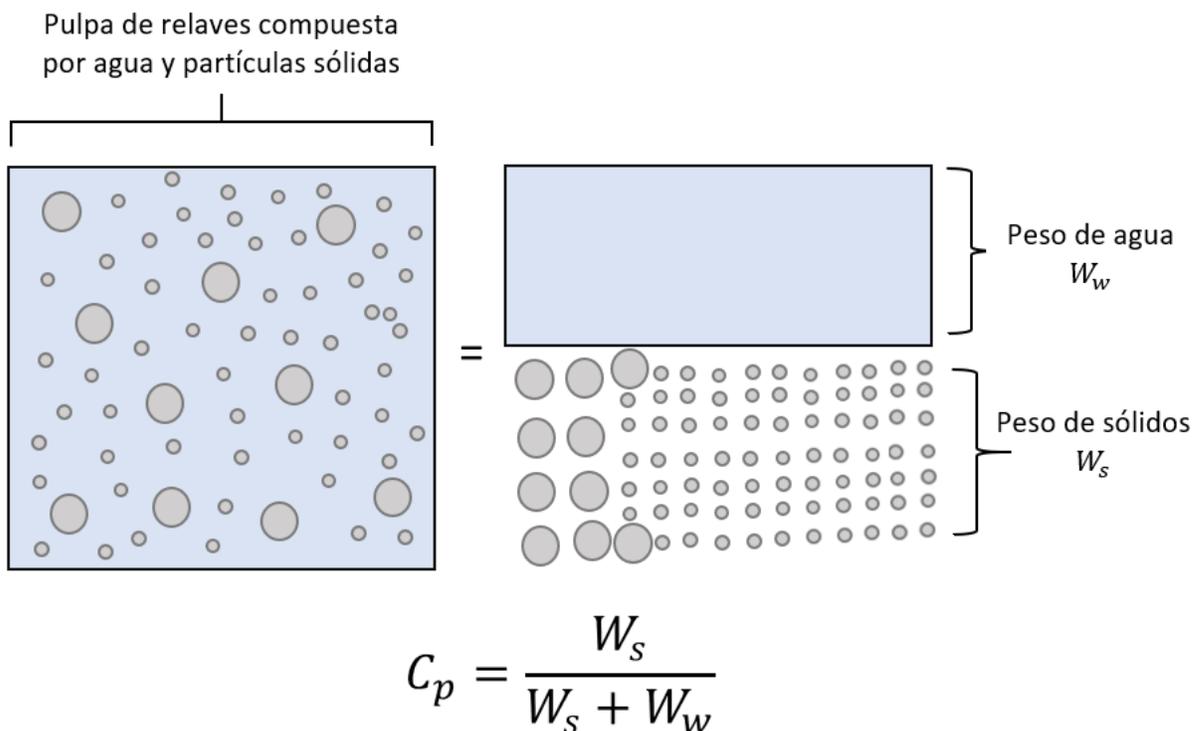


Figura 2.1: Representación gráfica de la concentración en peso de sólidos.
Elaboración propia.

En el contexto del transporte hidráulico de sólidos, es presumible que el C_p del relave pueda variar con la distancia desde el punto de descarga, principalmente debido a la sucesiva

depositación de sólidos en la evolución del flujo del relave y la liberación de agua producto de la sedimentación (bleeding).

De la ecuación 1.1, el C_p se puede escribir como:

$$C_p = \frac{W_s}{W_s + W_w} = \frac{1}{1 + \frac{W_w}{W_s}} = \frac{1}{1 + \omega} \quad (2.1)$$

Recordando que, en una condición saturada, como lo es propia del relave:

$$e = \omega G_s \longrightarrow \omega = \frac{e}{G_s} \quad (2.2)$$

Con lo cual:

$$C_p = \frac{1}{1 + \frac{e}{G_s}} \quad (2.3)$$

Además, de la relación para la densidad de suelos:

$$\gamma = \gamma_w \frac{G_s + Se}{1 + e} \quad (2.4)$$

Donde:

- γ : Peso específico del suelo
- γ_w : Peso específico del agua
- S: Saturación
- G_s : Peso específico de sólidos
- e : Índice de vacíos
- ω : Humedad

Posteriormente, analizando el peso específico del suelo (ecuación 2.5).

$$\gamma_s = \gamma_w \frac{G_s}{1 + e} = \gamma_w \frac{1}{\frac{1}{G_s} + \frac{e}{G_s}} = \gamma_w \frac{1}{\frac{1}{G_s} + \frac{e}{G_s} + 1 - 1} = \gamma_w \frac{1}{\frac{1}{G_s} + \frac{1}{C_p} - 1} \longrightarrow \gamma_s \propto C_p \quad (2.5)$$

Con el resultado anterior, se observa que el C_p se puede escribir en términos del índice de vacíos y del G_s . Considerando que el G_s se mantiene constante debido a que es una propiedad del sólido presente, la variación del C_p se relaciona directamente con la variación de densidad (a menor C_p , menor densidad seca).

En la depositación de relaves, la condición del C_p inicial o de depositación describe el punto inicial de la curva de consolidación en el espacio $e - p'$ (figura 2.2):

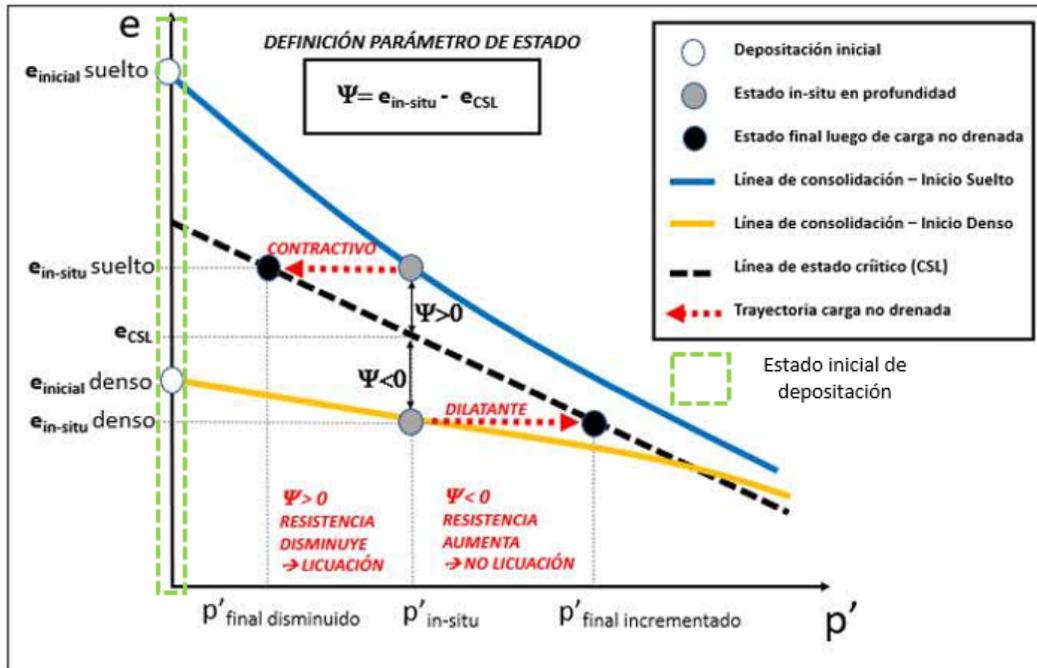


Figura 2.2: Parámetro de estado y curvas de consolidación densa y seca.

La figura 2.2 muestra la evolución de la línea de consolidación para suelos que inicialmente se encuentran en estado denso y suelto (bajo y sobre la línea de estado crítico, respectivamente).

Tomando en cuenta que en la deposición de relaves se tiene una acumulación cíclica de capas depositadas, las capas más antiguas se verán consolidadas por las más nuevas y este aumento de carga vertical puede describir una línea de consolidación en el lado denso (línea amarilla en 2.2) o suelto (línea azul), dependiendo del estado en el cual fue depositado la capa inicial de relaves (índice de vacíos y parámetro de estado). Cabe mencionar que siempre se busca estar en el lado denso para evitar el decaimiento de la resistencia en una situación no drenada y por lo anterior, es necesario establecer un procedimiento adecuado para, primero, conocer este punto inicial del índice de vacíos dado por la deposición y posteriormente establecer procedimientos adecuados de consolidación y secado (tiempos de secado) para obtener densidades que aseguren el comportamiento denso del suelo.

Si bien inicialmente se tendrá un C_p particular en cada punto de la deposición, posteriormente el relave comienza a perder agua y a contraerse antes de depositar nuevamente sobre él, este proceso se conoce como ciclo de secado y se puede entender como el tiempo que se deja inactivo algún sector de la deposición, durante este tiempo actúa la evaporación, sedimentación y consolidación del relave, estos mecanismos reducen el índice de vacíos y aumentan la densidad del relave depositado. Finalmente, el estado inicial de la capa depositada queda dado por la correcta estimación del índice de vacíos del relave que se sometió a algún ciclo de secado, este valor se puede obtener realizando ensayos de densidad y humedad al relave depositado. Teniendo el dato del índice de vacíos del relave depositado, este punto representa el punto inicial en la línea de consolidación en el espacio $e - p'$ (figura 2.2) y conociendo el comportamiento geomecánico del relave, se pueden establecer densidades objetivo que promuevan el comportamiento dilatante.

Finalmente, sobre los ciclos de secado resulta relevante el espesor de capa, entiendo que dada una geometría, el espesor de capa queda dado por el tiempo que se depositó en algún sector. Teniendo como antecedente que se realiza una depositación cíclica, es deseable que los diferentes sectores del depósito estén inactivos (en secado) el menor tiempo posible, por lo cual se promueven espesores de capa delgados que permitan que los tiempos de secado de cada capa sean adecuados para la operación.

2.2. Relaves espesados como tecnología

Los relaves espesados, como su nombre lo indica, implica el proceso de desaguado de la pulpa de relaves que contienen bajo porcentaje de sólidos (Fourie, 2003). Este proceso se lleva a cabo mediante espesadores, en los cuales se ingresa la pulpa de relaves y en su interior sedimenta, recuperando agua por rebalse y produciendo un relave de alto porcentaje de sólidos ($> 65\%$).



Figura 2.3: Espesador de relaves del tipo DCT (Deep Cone Technology).
Minera Centinela.

Si bien los relaves espesados resultan ser más costosos debido a los equipos necesarios

para producirlos (espesadores, figura 2.3), estos tienen diversos beneficios, siendo el principal la mayor recuperación de agua en planta, disminuyendo pérdidas en el transporte o en su almacenamiento (Fourie, 2003). También, otro beneficio corresponde al menor impacto ambiental, pues se ingresa una menor cantidad de agua al depósito y se reducen así filtraciones, derrames de aguas o que esta actúe como transporte en un flujo de relaves.

El espesamiento al producir relaves con un alto porcentaje de sólidos, permite que tengan una mayor resistencia (τ_y , yield stress) favoreciendo que al depositarse formen pendientes mayores que para relaves convencionales, lo que aumenta la capacidad del depósito sustancialmente, para una misma área. Un relave convencional no supera el 1% en sus pendientes de depositación, en cambio, para relaves espesados, dependiendo de sus características reológicas y la metodología de depositación, las pendientes varían entre 1% - 4%. Finalmente, dado el aumento de la resistencia del relave depositado, al tener un sólido con un menor grado de saturación, los muros de contención requeridos en la cubeta tiene un menor volumen, lo cual implica un costo significativamente menor, teniendo como premisa que los movimientos de tierra corresponden a las obras más costosas en cualquier proyecto ingenieril.

Los relaves espesados al tener un menor contenido de agua y al aplicar ciclos de secado, se promueve obtener niveles de saturación bajo el 80%, esta condición implica que sea poco probable que se presente licuación y además, al no tener mostrar segregación, se evita que se generen capas impermeables de finos las cuales evitan la disipación de presiones de poro.

En la figura 2.4 se aprecian los puntos expuestos: mayores pendientes de depositación, menores volúmenes de muros y mayor recuperación de agua.

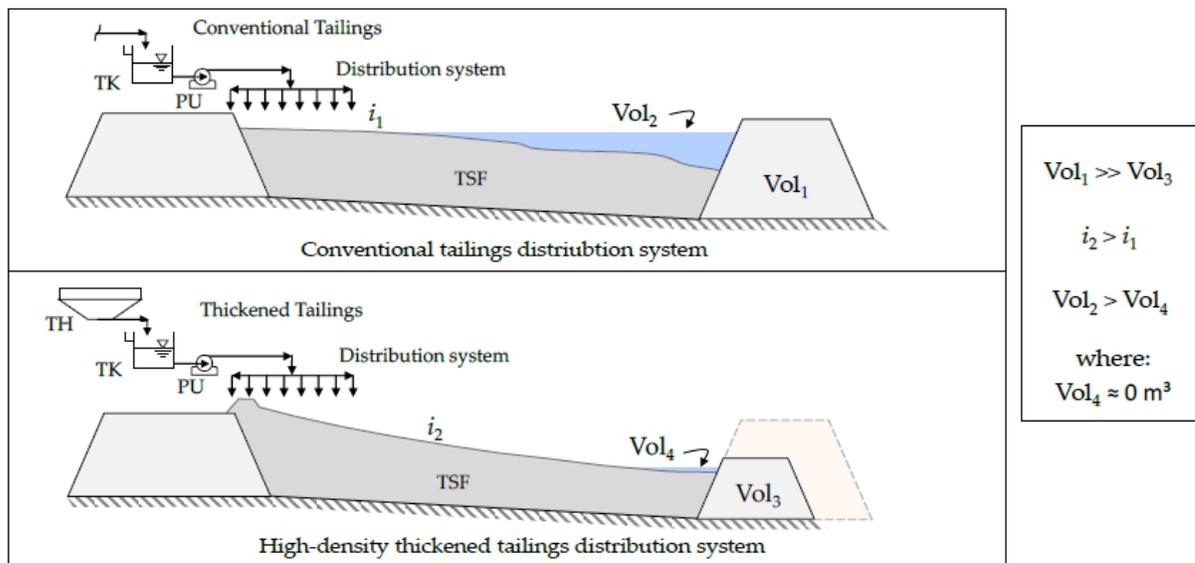


Figura 2.4: Diferencias de pendiente y almacenamiento de un relave convencional y espesado (Bazán, 2020).

Existen también ventajas técnicas en cuanto al uso de relaves espesados, particularmente, reducen o incluso eliminan el riesgo o consecuencias frente a una falla del depósito (ICOLD, 2001).

Así, la tecnología de desaguado y utilizar relaves espesados se convierte en una alternativa que reporta cada vez más una mejor relación costo-beneficio. Aún así, el comportamiento del relave posterior a su depositación no es bien conocido pues las variables que dominan el proceso de consolidación y secado dependen de cada sector. Una de ellas es la evaporación, la cual controla significativamente el comportamiento del relave en cuanto a la resistencia al corte y la cuantificación de las filtraciones (Simms et al., 2010).

2.3. Sobre la metodología de depositación

La sucesiva depositación del relave en capas y su secado permite la formación de una pendiente de depositación, lo cual aumenta sustancialmente la capacidad del depósito para una misma área, particularmente, para Centinela, la variación de 1 punto porcentual de pendiente global significa una diferencia de 40 % de capacidad total (figura 2.5).

Pendiente Promedio	2,1%	2,5%	2,8%	3,1%
Capacidad Final	750 Mt	1005 Mt	1158 Mt	1241 Mt
145ktpd	Ago-29	Jun-34	Abr-37	Nov-38
165ktpd	Dic-28	Feb-33	Sep-35	Ene-37

Figura 2.5: Capacidad del depósito según pendiente de depositación y tiempo de llenado. Documento de HATCH para Minera Centinela

El control de la depositación define la capacidad del depósito e influencia fuertemente la respuesta geotécnica y ambiental del relave (Simms et al. 2011). La recirculación de agua permite que se ingrese menos agua al depósito, lo cual disminuye el impacto ambiental del relave y además, el tener relave espesado significa una mayor concentración en peso de sólidos, lo cual implica resistencias más altas.

Se reconocen así tres aspectos claves para la depositación (Simms et al., 2011):

- Sucesivo ángulo de depositación
- Largo de la playa en la depositación
- Espesor individual de capa

Para una depositación cíclica, el espesor individual de capa controla la tasa de secado, y el espesor queda directamente determinado por el caudal y la reología presente en el relave en su escurrimiento (Simms et al. 2011). En el relave, la reología se puede resumir como la diferencia que tiene un fluido Newtoniano con uno no-Newtoniano debido a la presencia de partículas sólidas en el relave. Las partículas sólidas aportan con fricción, presentando yield stress y viscosidad. El yield stress representa la dificultad para comenzar a fluir, mientras que la viscosidad, representa la dificultad para fluir más rápido (Errázuriz, 2018).

Sobre la depositación, en el momento en el que se descarga el relave, dada la energía del flujo este tiende a canalizarse y a medida que pierde energía, aguas abajo llega a un punto donde se explaya, formando una depositación controlada en lo que se conoce como

"playa", es aquí donde gracias a las propiedades reológicas del relave, se forma la pendiente de deposición (figura 2.6). Este proceso se puede englobar como una transición entre el régimen turbulento (canalización) y laminar (playa) del flujo.

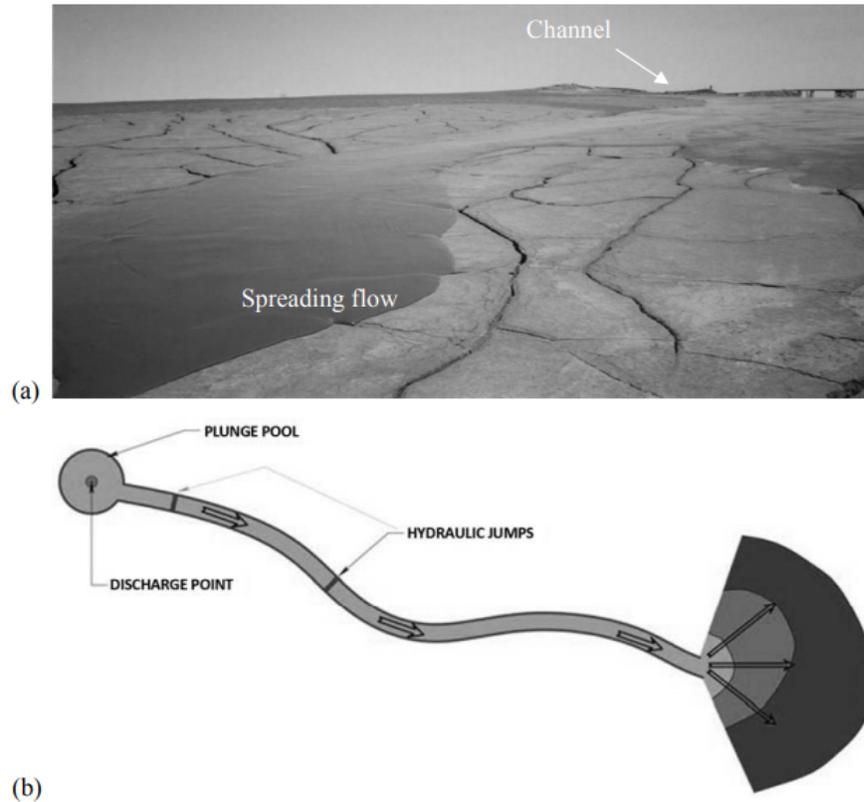


Figura 2.6: Deposición de relaves espesados (M.P.A. Williams, 2010).

La esquematización teórica de la figura 2.6 se pudo evidenciar en terreno, donde primero se canalizaba el flujo y posteriormente se producía la deposición como playa, como se muestra a la figura 2.7:



Figura 2.7: Deposición de relaves espesados, canalización y formación de playa.

Debido a la variabilidad de la geometría en el depósito y de la deposición día a día por

la producción de la planta, existen dificultades para controlar tanto el espesor de capa como las propiedades reológicas del relave. Esta variabilidad se puede conocer de mejor manera con una mayor experiencia operacional e investigación (Shuttleworth et al., 2005; Fitton et al., 2008; Henriquez and Simms, 2009; McPhail, 1995).

2.4. Reología y pendientes

En esta sección se analizará el relave espesado y su comportamiento, la formación de pendientes y cómo afecta el C_p a las propiedades reológicas del relave.

Dado que los relaves espesados tienen comportamiento viscoso y por tanto poseen yield stress (Li, 2011), estos se pueden modelar como un fluido no-Newtoniano y en particular, como un fluido de Bingham. Su principal característica es que las partículas que componen la pulpa aportan con esfuerzo de corte entre ellas (yield stress, τ_y). Este comportamiento es descrito mediante las ecuaciones constitutivas de Bingham (Li, 2011) y en la figura 2.8:

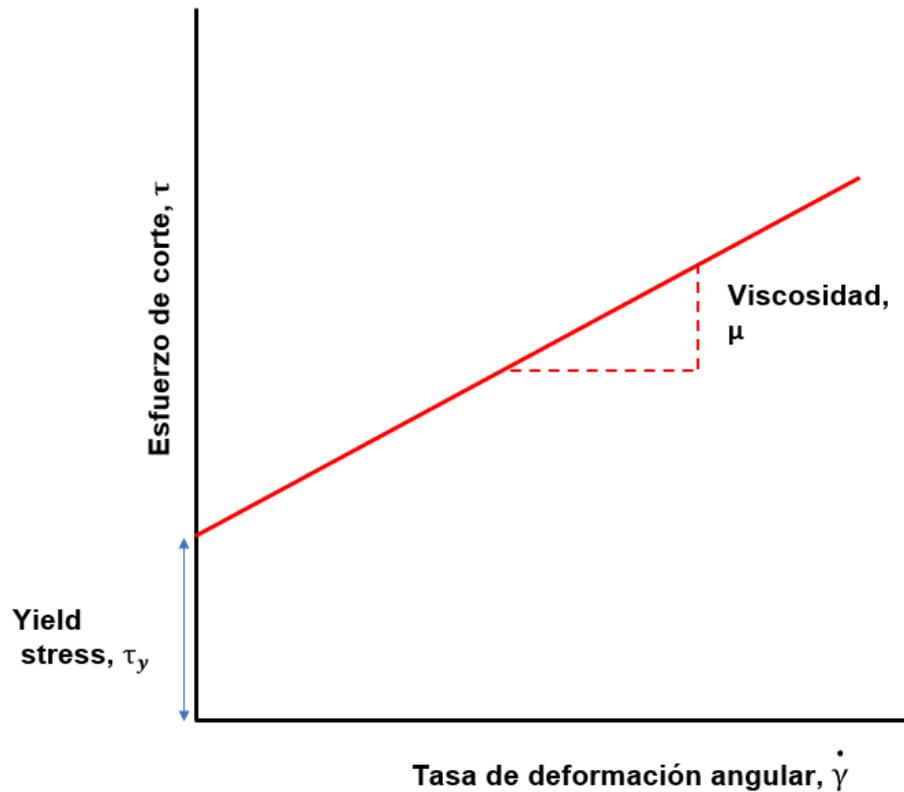


Figura 2.8: Formulación fluido de Bingham.

Lo anterior se corresponde con:

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{si} \quad \tau \leq \tau_y \quad (2.6)$$

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad \text{si} \quad \tau > \tau_y \quad (2.7)$$

Dado lo anterior, el proceso de formación de pendientes se puede ilustrar como la sucesiva acumulación de capas para los momentos en el cual el relave deja de fluir, principalmente debido a la resistencia al movimiento que tiene (τ_y). Para un escurrimiento, el flujo progresivamente pierde energía, llegando un punto donde la velocidad es tal que ocurre un balance con la fuerza resistiva asociada a τ_y , deteniéndose.

Existe una relación proporcional entre el C_p y el τ_y . En un extremo, si se tiene un relave con bajo C_p (menor al 30 %), este escurre prácticamente como agua, con un τ_y bajo, generando pendientes bajas de depositación, en cambio para un relave muy concentrado (alto C_p), el τ_y es cada vez mayor, teniendo pendientes altas. Es directo ver que para un relave excepcionalmente concentrado, se tiene un talud saturado. En particular, la relación entre el C_p y τ_y es potencial, como se observa en la figura 2.9:

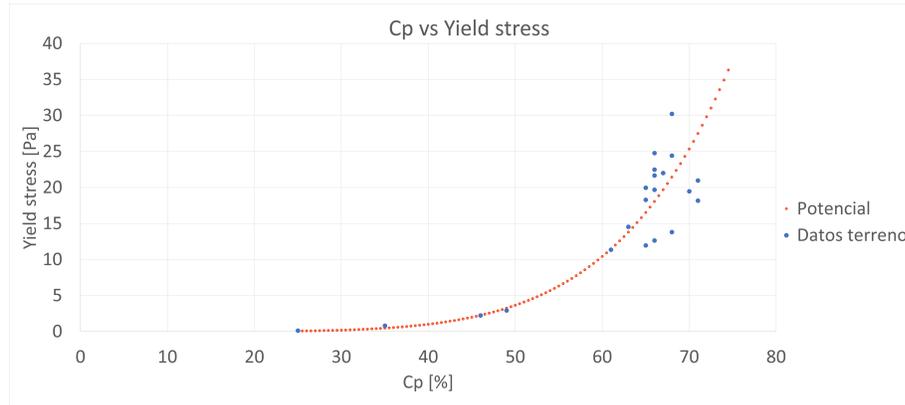


Figura 2.9: Relación del C_p y τ_y de Minera Centinela.

La curva potencial ajustada es:

$$\tau_y = [A + B * C_p]^\alpha \quad (2.8)$$

Con $A = 0.01$, $B = 0.02$, $\alpha = 5.8$

Los resultados de la figura 2.9 fueron tomados en terreno, obteniendo muestras cortando el relave, midiendo el C_p con balanza Marcy y τ_y con un reómetro en laboratorio, remoldeando la muestra (agitándola). Si bien estos procedimientos no son los adecuados para considerar las mediciones como altamente precisas, se muestran para ilustrar la relación entre estas variables. Se observa que la diferencia porcentual del C_p afecta sustancialmente el τ_y del relave. La forma ideal para obtener la curva de la figura 2.9 y por lo tanto de la ecuación 2.8 corresponde a preparar pulpas de relave a diferentes C_p (agregando agua al sólido seco en una proporción adecuada) para posteriormente medir τ_y en un reómetro, finalmente se tendría una nube de puntos que relacionaría C_p con τ_y .

Sobre el ángulo de depositación y su relación con las propiedades reológicas del relave, Ihle y Tamburrino (2009) propone el siguiente parámetro adimensional:

$$N = \frac{6\eta q(\gamma \sin(\theta))^2}{\tau_y^3} \quad (2.9)$$

Utilizando que el ángulo θ es pequeño:

$$N \approx \frac{6\eta q(\gamma\theta)^2}{\tau_y^3} \quad (2.10)$$

Imponiendo $N = 1$ para la condición de equilibrio:

$$\theta = \frac{\tau_y^{\frac{3}{2}}}{\gamma\sqrt{6\eta q}} \quad (2.11)$$

Donde:

- τ_y [Pa]: Yield stress
- η [Pa · s]: Viscosidad plástica
- q [$\frac{m^2}{s}$]: Caudal por unidad de ancho del flujo
- γ [$\frac{N}{m^3}$]: Densidad específica del relave
- θ : Ángulo sucesivo de depositación de relaves

N da una explicación sobre el régimen de descarga y de formación de la playa, el ángulo asociado a $N = 1$ puede ser interpretado como el mínimo ángulo para comenzar a tener un balance entre las fuerzas gravitacionales y viscosas, tal balance indica la estabilidad del movimiento del fluido, donde valores menores de N (ángulos menores) indican que el flujo se detendrá (Errázuriz, 2018).

El parámetro N para las capas nuevas que se descargan y aún no se depositan es mayor a 1, mientras que para el relave que progresivamente se detiene es menor a 1. Si se toma en cuenta que τ_y varía con la distancia debido a la variación del C_p , al disminuir el C_p disminuye también η y γ , pero su diferencia es menor en comparación a la de τ_y . Teniendo cambios en el contenido de sólidos para la mayoría de relaves, la variable más afectada es el yield stress (τ_y), seguida por la viscosidad plástica (η) y la menos sensitiva, el peso específico de la pulpa (γ) (Errázuriz, 2018).

Si en la distancia τ_y disminuye, observando la ecuación 2.9 τ_y tiene exponente $\frac{3}{2}$ y a pesar de que η y γ disminuyen, no compensarían completamente el decrecimiento de τ_y y si imponemos en esta condición $N = 1$ o menor, necesariamente θ disminuye con un relave menos concentrado en la distancia.

Para la campaña de muestreo ejecutada en esta memoria, se espera una tendencia a la disminución del C_p con la distancia al punto de descarga, este no es un resultado nuevo, pues los modelos de estimación de formación de pendientes (modelos tales como: Li, 2011; Errázuriz, 2018) consideran una disminución en la distancia tanto del C_p como del yield stress τ_y del relave. Lo anterior es lógico dado que tales variables son proporcionales, como se observa en la figura 2.9. Esta disminución tanto del C_p como del τ_y explica las pendientes cóncavas en la depositación de relaves espesados por la variación del ángulo de depositación. A la fecha no existe una explicación clara para este fenómeno, múltiples autores han propuesto respuestas

frente a esto, mencionando que se debe a la pérdida de sólido en la distancia (relave segregante) o al bleeding (relave libera agua en su escurrimiento).

2.5. Sobre el proceso de consolidación y secado del relave

Posterior a la depositación, existen tres mecanismos que favorecen el aumento de la densidad, estos son: sedimentación, secado y consolidación (Simms et al., 2010). A continuación se dará una breve explicación sobre cada uno de estos mecanismos.

2.5.1. Sedimentación

La sedimentación corresponde a la progresiva decantación de las partículas sólidas que se encuentran suspendidas en la pulpa producida por el actuar de la fuerza de gravedad. Las partículas sólidas tienden a moverse al fondo de la mezcla, mientras que el agua queda suspendida en la superficie (figura 2.10). Para algún tiempo posterior, la pulpa se concentra en la zona inferior y en la superficie se acumula el agua.

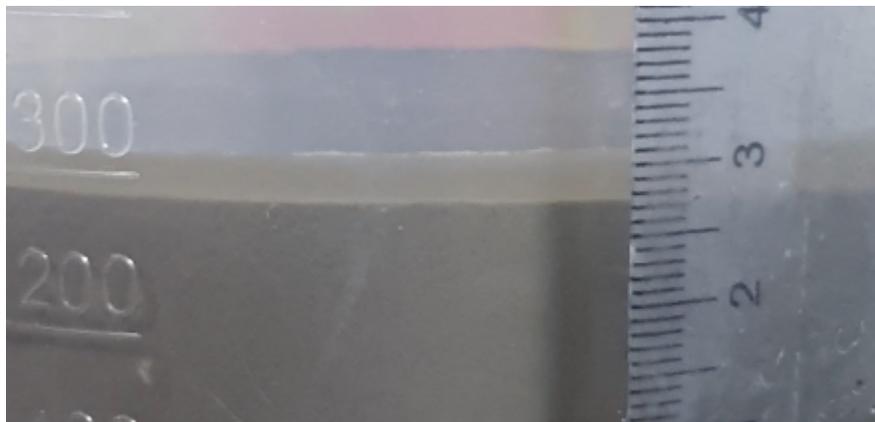


Figura 2.10: Sedimentación de pulpa de relaves.

La sedimentación puede ser de gran relevancia en relaves que contienen un gran porcentaje de agua en climas húmedos (Simms et al., 2010). La sedimentación actúa desde el momento en el que el relave empieza a escurrir en el flujo, liberando agua, fenómeno denominado "bleeding".

2.5.2. Secado

En cuanto al secado, corresponde al factor de mayor relevancia en un clima árido como es el caso de esta memoria y se puede modelar como un fenómeno de dos etapas. La etapa 1, corresponde a estimar la tasa de evaporación de agua debido al clima del lugar mediante la ecuación de Penman o expresiones similares. La etapa 2 ocurre cuando la succión total en la superficie de la capa alcanza un valor tal que el gradiente de la humedad relativa entre la

superficie del sólido y la atmósfera comienza a decrecer (P. Simms et al., 2010). A continuación se extenderá la explicación sobre estas etapas:

2.5.2.1. Etapa 1 secado

Se seca la capa debido a la evaporación en el sitio hasta que se forma un gradiente entre la zona más superficial de la capa, esta zona corresponde a una costra que está más seca que el interior de la capa. A grandes rasgos se puede entender que durante la etapa 1 el relave se mantiene saturado, posteriormente (etapa 2), debido a la diferencia de secado en la verticalidad de la capa, el relave pasará a estar parcialmente saturado.

2.5.2.2. Etapa 2 secado

En esta etapa, dado el gradiente de humedad que se forma entre la costra de la zona superior y el resto de la capa, comienza a actuar succión entre ellas, progresivamente secando el resto de la capa. Este proceso demora más tiempo pues al existir la costra más seca en la zona superior, esta actúa como una barrera aislante de la evaporación.

En resumen, la etapa 2 se produce cuando la superficie del relave se secó con respecto a la humedad relativa del ambiente, formando una costra y el sucesivo secado del interior de la capa corresponde a la succión hacia tal costra. Se observa así que para climas donde no se desarrolla un gran espesor seco en la fase 1, para capas gruesas de depositación, la superficie del relave puede secarse pero el interior de ella no, por lo cual no se desarrolla la resistencia al corte debido al alto contenido de agua y se limita el ángulo de depositación, dado que la capa al no estar lo suficientemente seca, posteriormente al depositar sobre ella, el relave fresco removería el lecho anterior, canalizando. Esta etapa 2 de secado puede ser más relevante en relaves salinos donde se forma una costra de sal, la cual puede afectar el secado.

2.5.3. Consolidación

Una vez que el relave deja de sedimentar empieza la consolidación por peso propio, este mecanismo implica una disminución del contenido de humedad como la disminución del índice de vacíos, además, una vez se deposita nuevamente sobre relaves previos, aumenta progresivamente la densidad debido a la consolidación generada por el aumento de la carga vertical y el drenaje.

La sedimentación, secado y consolidación se esquematizan en la figura 2.11. Para la parte más superficial de la capa se tiene el efecto de la evaporación, flujo de succión para la zona intermedia y la interfaz entre capas y consolidación para las capas más antiguas.

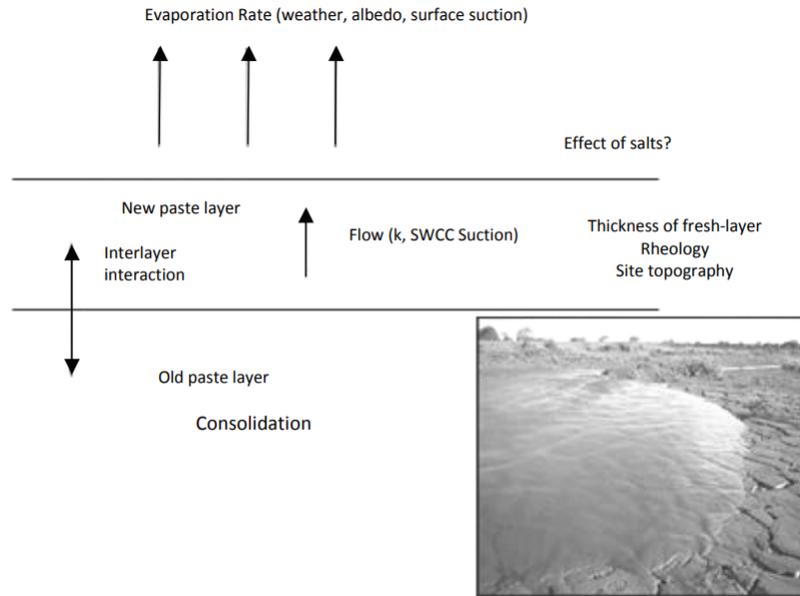


Figura 2.11: Variables que afectan al secado de un relave recién depositado (Modificado desde Simms et al., 2007).

Es de relevancia hacer notar que se debe evitar un exceso de evaporación en el relave, pues esto puede llevar a una de-saturación del mismo, produciendo ingreso de oxígeno. En tal situación, si el relave es lo suficientemente sulfurado, esto puede llevar a la generación de ácidos, lo cual no es deseable. Dado lo anterior, se debe encontrar un óptimo de secado. Este punto óptimo se puede ilustrar como una comparación entre índice de vacíos, contenido de agua, grado de saturación, aumento de resistencia y difusión de oxígeno, como se muestra en la figura 2.12 (Fisseha et al., 2010). En esta memoria no se abordará en mayor detalle esto, pero para obtener tal punto óptimo se debe estudiar la curva de difusión de oxígeno junto con la de saturación y shear vane.

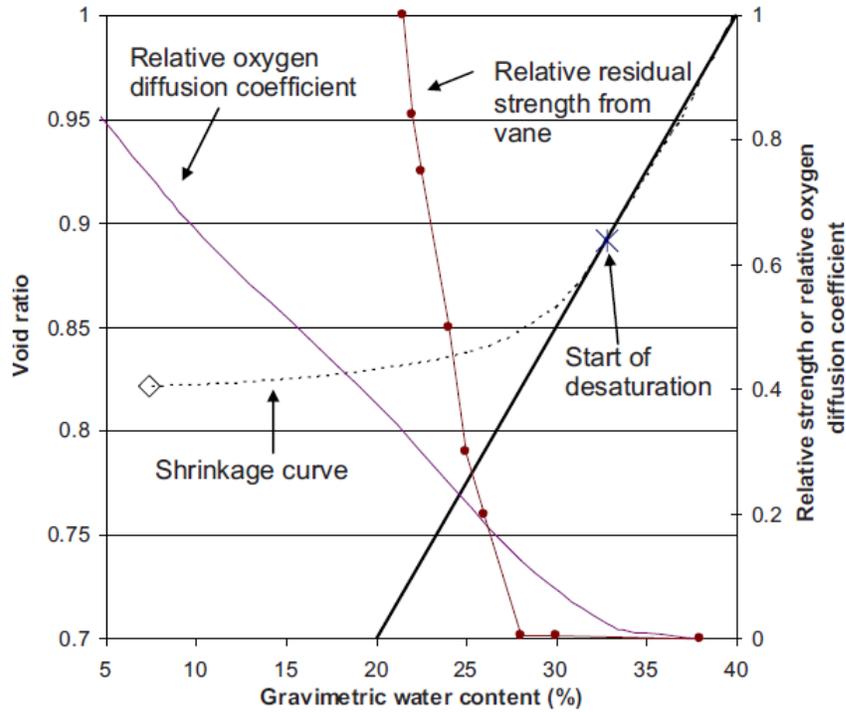


Figura 2.12: Relación entre índice de vacíos, saturación, resistencia y difusión de oxígeno (Modificado desde Simms et al., 2007).

En esta memoria se consideran como mecanismos relevantes en el proceso de consolidación y secado la sedimentación y el secado como etapa 1 (evaporación) pues se tienen capas delgadas en la depositación además de un clima desértico. La evaporación quedará dada por su valor promedio en el sector (Sierra Gorda, Calama) ($3.6 [\frac{m}{año}]$). Para la sedimentación, se utilizará el software CONDES0 que se introducirá en la siguiente sección.

2.6. Software CONDES0

Con el objetivo de estimar la sedimentación del relave, en esta memoria se utiliza el software CONDES0 (Yao et al., 2002) el cual asignando ciertos parámetros al suelo se estima tanto la sedimentación, como la distribución de índice de vacíos en un perfil de altura de suelo con algún contenido de agua para diferentes tiempos. Lo anterior proviene de que en una columna de suelo, las capas más inferiores están sometidas a un esfuerzo vertical mayor dado el peso de las capas superiores.

Los parámetros mencionados se deben estimar según la curva de conductividad hidráulica v/s índice de vacíos (permeabilidad) y de esfuerzo efectivo v/s índice de vacíos (compresibilidad).

Teniendo respectivamente las ecuaciones de compresibilidad y permeabilidad, los parámetros a estimar son:

$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (2.12)$$

$$k = Ce^D \quad (2.13)$$

Donde:

- A, B, C, D: Parámetros a calibrar de CONDES0
- e: Índice de vacíos
- σ' : Esfuerzo efectivo
- k: Conductividad hidráulica

Estos parámetros se estimarán mediante ensayos de sedimentación simples, realizando una calibración iterativa de los parámetros hasta que las curvas de sedimentación entregadas por CONDES0 coincidan con los ensayos de sedimentación.

2.7. Conclusiones sobre la revisión

Se observa que existen diversas ventajas al utilizar relaves espesados en una faena minera, donde su uso cada vez es más frecuente debido a la escasez hídrica y sus ventajas operacionales y técnicas. Aún así, el principal beneficio que corresponde a la mayor capacidad para una misma área en el depósito, debido a las mayores pendientes de depositación, es un parámetro que requiere de un detallado estudio.

Se evidencia que uno de los principales factores que permiten la depositación con una mayor pendiente corresponde a la reología del relave, la cual está directamente relacionada con el sólido depositado y su concentración (C_p). También influye el tiempo de operación pues esto define el espesor de capa.

Sumado a lo anterior, el sólido depositado y su densidad inicial, se relaciona directamente con la resistencia que desarrolla frente a nuevas solicitaciones según el parámetro de estado (Ψ), por lo tanto es relevante controlar y conocer la densidad que se deposita en terreno con métodos adecuados de secado posterior a la depositación.

El estado inicial del relave queda definido por el ciclo de secado al cual estuvo sometido, se evidencia que existen dos variables que definen la densidad inicial, las cuales son la sedimentación y el secado. La sedimentación queda dada por la cantidad de agua presente en la pulpa (C_p de depositación), siendo de relevancia durante la depositación, el transporte de sólidos y las primeras horas. Por lo tanto, para tiempos posteriores a la depositación, el principal factor a controlar corresponde al secado, asociando una cantidad de tiempo adecuada para obtener densidades de depositación previas a descargar relave fresco sobre la capa anteriormente depositada. La consolidación es un proceso posterior y se relaciona con el actuar del peso propio y con el aumento de la carga vertical debido a la sucesiva depositación de capas.

Esta memoria busca entregar metodologías adecuadas para el estudio de la depositación del relave espesado y su densidad, lo que se relaciona directamente con el C_p que se deposita. Para lo anterior, se estudiarán los tiempos de operación y de secado, distinguiendo el relave en sus dos fases, como relave fresco y en proceso de consolidación y secado. Así, se busca dar

una respuesta a la variación del C_p en terreno y su influencia en la pendiente de depositación y concavidad de las playas y cómo adecuar los ciclos de secado para obtener densidades depositadas adecuadas.

Capítulo 3

Metodologías de muestreo

3.1. Motivación y condición en terreno

El primer objetivo específico de esta memoria corresponde a desarrollar una metodología de muestreo para relaves espesados en sus dos condiciones, como relave fresco y en proceso de consolidación y secado.

Se entiende como relave fresco aquel que es recientemente depositado en un área inactiva, donde días antes se depositó relave y se dejó secar un determinado tiempo.

Se entiende como relave en proceso de consolidación y secado aquel que luego de su depositación, se deja secando una determinada cantidad de tiempo con tal de asegurar los requerimientos necesarios en la depositación. En sí, este relave sigue siendo fresco, pues fue recientemente depositado y día a día se busca conocer la evolución de su humedad y densidad.

Las condiciones que se tienen en terreno para un relave espesado son ciertamente diferentes a las de un relave convencional, pues al ser una descarga controlada con playas de depositación, el sector a inundar se llena progresivamente, lo cual permite tomar muestras en el desarrollo de la lengua, como se aprecia a continuación:



Figura 3.1: Condición a muestrear.

Para el segundo caso de un relave en proceso de consolidación y secado, al depositar en

capas delgadas y permitiendo que el agua contenida en el relave fresco se seque, se forman capas bien diferenciadas para cada depositación, lo cual sugiere que se debe muestrear la capa objetivo.



Figura 3.2: Capas de relave depositado.

3.1.1. Estado del arte

3.1.1.1. Relave fresco

Con respecto al muestreo de relaves frescos, hasta el momento no existen metodologías para muestrear relave aguas abajo en el transcurso de la depositación, únicamente se toman muestras a la salida del spigot con un cortador, esta metodología ciertamente es adecuada cuando nos encontramos en el inicio del escurrimiento, pues la tubería se encuentra elevada y aún no entra en contacto con el lecho, por lo tanto, se requiere de un muestreo innovador para muestrear relave en la formación de playas.

3.1.1.2. Relave en proceso de consolidación y secado

Para esta situación, existen metodologías para tomar muestras, como el cono de arena, donde se mide la densidad del terreno y se recupera el sólido retirado al tallar el cono. Si

bien esta metodología es adecuada para un suelo uniforme, las capas de relave que se forman no representan un suelo uniforme pues cada capa depositada tiene características diferentes de acuerdo a la depositación y la operación. Dado lo anterior, se debe idear una metodología para muestrear la capa objetivo.

3.2. Metodología de muestreo desarrollada en este trabajo

3.2.1. Relave fresco, ‘trampa de relaves’

Para el relave fresco se debe diseñar un dispositivo el cual sea capaz de tomar una muestra representativa del relave en el desarrollo de su depositación.

Para el muestreo surgen las ideas de perforar el lecho de depositación e instalar un recipiente, la principal desventaja de lo anterior es que al tener un gradiente de altura, se capturaría una muestra acuosa (agua negra, se observa en la figura 3.3) debido a las grietas que se forman en el relave parcialmente seco, lo cual no es representativo. Otra opción corresponde a cortar el flujo del relave con un recipiente o una pala, lo anterior tiene como desventaja que se debe tener especial cuidado con no retirar relave del lecho parcialmente seco, por lo cual, nuevamente, esta metodología afectaría la representatividad del muestreo.



Figura 3.3: A la izquierda, agua negra que se debe evitar muestrear.

El muestreador debe ser capaz de capturar el relave que efectivamente llega a la zona donde se sitúe. Se propone un dispositivo el cual sea plano y pueda adquirir una forma de cubeta, almacenando el relave en su interior.

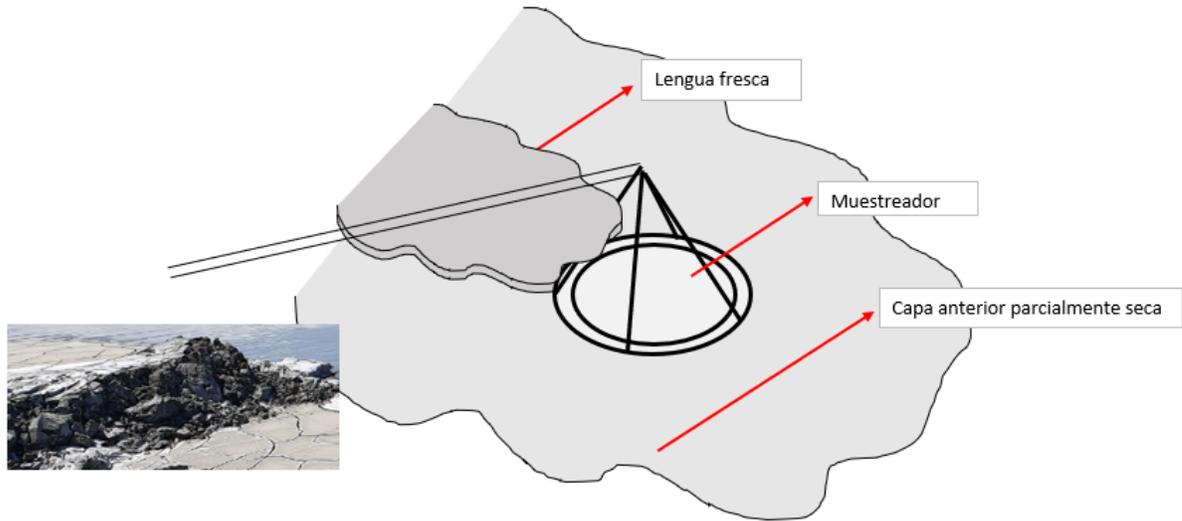


Figura 3.4: Muestreo de relave fresco, se indica que el muestreo debe ser realizado desde un pretil cercano por motivos de seguridad.

La idea concebida corresponde a un marco metálico con perforaciones en su diámetro al cual se le adosa una membrana plástica y en su interior contiene una placa metálica (figura 3.6), la cual favorece la forma de cubeta al levantarlo. A continuación se muestran imágenes del dispositivo ideado:



Figura 3.5: Izquierda: Diagrama del muestreador, Derecha: Muestreador.



Figura 3.6: Izquierda: Muestreador plano, Derecha: Muestreador levantado como cubeta.

El resultado final de esta metodología es obtener una muestra representativa del relave depositado, permitiendo secarla en laboratorio, obteniendo su humedad (C_p). Para ver un mayor detalle de la metodología, ver el anexo F.

3.2.2. Relave en proceso de consolidación y secado

Para esta situación, se debe muestrear la capa objetivo, por lo cual se propone utilizar un ‘tubo shelby’ y una lámina diferenciadora de capa. El tubo shelby es un tubo de pvc y la lámina una placa metálica o de plástico la cual permita ser introducida entre capas para diferenciar y posteriormente introducir el tubo para retener la muestra en su interior. Como se conocen las dimensiones del tubo y midiendo la altura de la capa, es directo el cálculo del volumen de la muestra recuperada y por lo tanto la densidad. Se presentan diagramas para esquematizar lo descrito anteriormente:

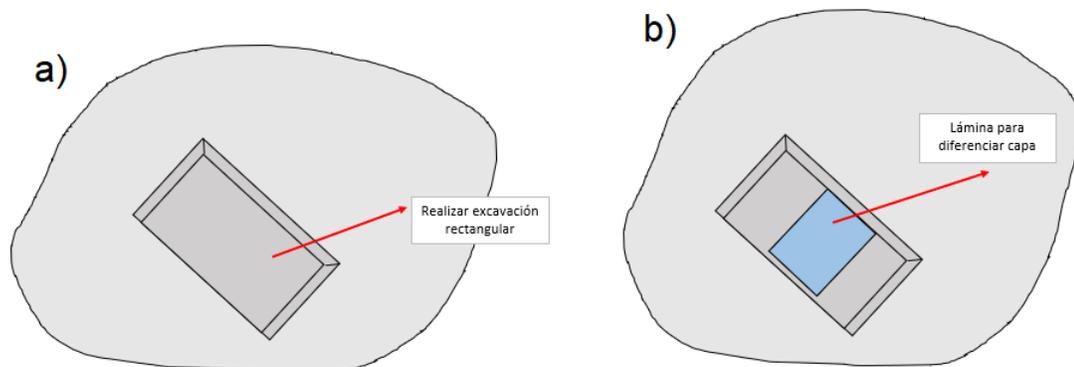


Figura 3.7: Izquierda: Sector a muestrear, Derecha: Lámina diferenciadora. Realización propia.

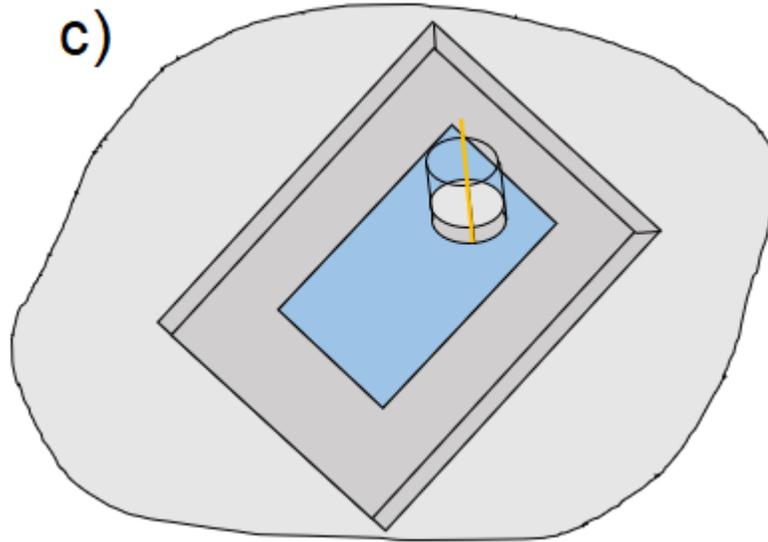


Figura 3.8: Tubo shelby introducido con muestra recuperada y medición de altura.

Esta metodología de muestreo permite obtener variables importantes sobre la depositación, las cuales son:

- Altura de capa
- Densidad in-situ del relave y densidad seca

Para revisar la metodología con mayor detalle, ver el anexo G.

3.3. Calibración de trampa de relaves

Para el caso de la trampa de relaves, su precisión fue puesta a prueba, realizando pruebas de laboratorio, la metodología empleada fue la siguiente:

- Se confeccionaron pulpas de relave a diferentes C_p (60 %, 62 % y 65 %). Se escogieron estas concentraciones pues corresponden al rango en el cual la depositación de relaves de Centinela se encuentra.
- Utilizar metodología estandarizada de muestreo para las pulpas confeccionadas
- Secar muestras obtenidas y comprobar C_p

Cabe mencionar que esta metodología, dadas las condiciones de pandemia, fue aplicada en un laboratorio casero, sin desmedro de tener condiciones de laboratorio, todos los procedimientos fueron adecuadamente estudiados y estandarizados con los propios de un laboratorio. En particular, el principal componente a simular fue el horno de laboratorio, el cual fue reemplazado por un horno eléctrico de cocina a temperaturas adecuadas en relación a las de laboratorio.

Para las pulpas confeccionadas se utilizó un peso de 2500 [gr] de relave seco, variando el peso de agua a utilizar según la siguiente relación:

$$W_a = W_s \left(\frac{1}{C_p} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Donde:

- W_w [g]: Peso de agua
- W_s [g]: Peso de sólidos
- C_p [%]: Concentración en peso de sólidos

Estas pulpas se unificaron tomando el peso seco de sólidos y el peso de agua, revolviendo hasta obtener una pulpa homogénea de relaves al C_p deseado.

Tabla 3.1: Masas de sólido y agua utilizados.

C_p [%]	W_s [gr]	W_w [gr]
60	2500	1667
62	2500	1532
65	2500	1346

Confeccionadas las pulpas, estas se muestrean de la siguiente manera:



Figura 3.9: Muestreador situado de forma plana.

El muestreador se sitúa de forma plana sobre la superficie en la cual posteriormente se depositará relave, buscando simular las condiciones de terreno.



Figura 3.10: Relave de C_p conocido cubre muestreador.

Relave de un C_p conocido cubre al muestreador, posteriormente es levantado.



Figura 3.11: Muestreador con relave levantado como cubeta.

Como se puede apreciar, al levantar el dispositivo este adquiere la forma de cubeta, almacenando el relave en su interior. Posteriormente se recupera la muestra del interior lavando el muestreador con una masa de agua conocida.



Figura 3.12: Muestra pesada y secada.

Finalmente, la muestra recuperada junto con el de agua adicionada es pesada y posteriormente se seca en un horno para obtener el peso seco, permitiendo calcular el contenido de humedad (C_p).

Tabla 3.2: Resultados precisión trampa de relaves.

C_p Confección [%]	W_p [gr]	W_s [gr]	C_p Medido [%]	ΔC_p [%]
60	1879	1131	60.19	0.19
62	1695	1052	62.06	0.06
65	1635	1059	64.77	0.23

Tomando en cuenta que se busca medir variaciones de puntos porcentuales de C_p , se concluye que el muestreador para relave fresco es apto para las mediciones a realizar.

Capítulo 4

Muestreo en terreno y resultados

4.1. Medición de relave fresco

En primera instancia se busca comprobar si existe una variación con respecto al C_p y granulometría en la depositación de relaves de Minera Centinela según la distancia con respecto a la planta.

Para lo anterior, se propone una campaña de muestreo la cual incluye 20 ensayos de C_p según la metodología confeccionada en la presente memoria, además de ensayos de granulometría a las muestras obtenidas por el personal en terreno. Los resultados de C_p y granulometría serán comparados con los datos reportados desde planta, para observar las diferencias que existen en la evolución de la depositación según la distancia.

La nomenclatura de las muestras siguen la sigla FXXX, F de muestra fresca y XXX el número correspondiente.

Cabe mencionar que de las 20 muestras tomadas, 5 no se consideran en los análisis pues dado el respaldo de video de las muestras tomadas, se considera que el muestreo no fue al adecuado debido a faltas en la metodología aplicada o el sector muestreado (sectores donde se acumulaba relave excepcionalmente acuoso).

4.1.1. Datos de planta

Los datos de planta utilizados para el C_p se obtienen mediante densímetro nuclear. Las muestras de C_p de terreno son tomadas en días determinados, por lo cual se toman datos de los densímetros nucleares de acuerdo al día en que se tomó cada muestra. Ciertamente existen variaciones diarias en el C_p de planta, pero estas variaciones no superan el punto porcentual, por lo cual no afectan el análisis.

Sobre las granulometrías, son muestras tomadas con un cortador de relaves en planta en una ventana horaria de 4 muestras diarias (24 [h]). Las muestras tomadas en terreno se comparan con la ventana de horario de las granulometrías en planta de acuerdo a los horarios en las cuales fueron tomadas.

4.1.2. Metodología aplicada en terreno

La metodología aplicada en terreno fue la indicada en un documento con indicaciones paso a paso (anexo F). Si bien existieron puntos que no se cumplieron a cabalidad en los primeros muestreos, estos fueron rápidamente detectados y solucionados gracias al oportuno reporte y documentación en video de las muestras tomadas.



Figura 4.1: Ubicación del muestreador en terreno.

En primera instancia el muestreador es situado en una zona donde prontamente y por primera vez se depositará relave (figura 4.1).



Figura 4.2: Muestreador cubierto por relave en terreno y proceso de obtención de la muestra.

El muestreador es cubierto por la depositación, posteriormente y con las medidas de seguridad adecuadas, el personal en terreno recupera el muestreador con el relave en su interior, lavando los restos con un peso de agua previamente conocido (figura 4.2)



Figura 4.3: Recuperación de muestra y pesaje.

La muestra se almacena en un recipiente adecuado (figura 4.3) y se pesa para su posterior traslado a laboratorio. Observar que una vez se obtiene la medida del peso en terreno resulta indistinto el tiempo en el cual se comience a secar. Lo anterior es relevante por los tiempos de traslado entre el depósito y el laboratorio.

4.1.3. Resultados C_p

A continuación se analizará la variación del C_p según la distancia. La distancia corresponde a la distancia euclidiana entre el punto en el cual fue tomada la muestra y el spigot en que se estaba descargando.

Primero se muestra el C_p de las muestras tomadas según la distancia (figura 4.4).

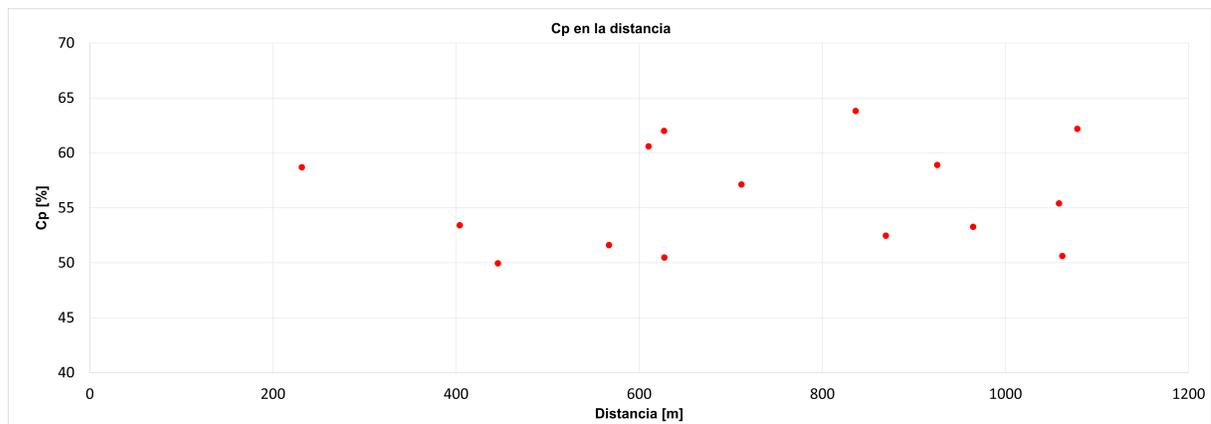


Figura 4.4: C_p de las muestras tomadas en la distancia.

La variación de C_p para algún punto x en la distancia se define como:

$$\Delta C_{p_x} = C_{pPlanta} - C_{pMuestra_x} \quad (4.1)$$

Donde:

- ΔC_{p_x} : Variación de C_p en algún punto x en la distancia
- $C_{pPlanta}$: C_p reportando desde planta.
- $C_{pMuestra}$: C_p obtenido mediante la metodología de muestreo para relave fresco a una distancia x.

En la figura 4.5 se muestra la diferencia de C_p para las muestras tomadas según la distancia.

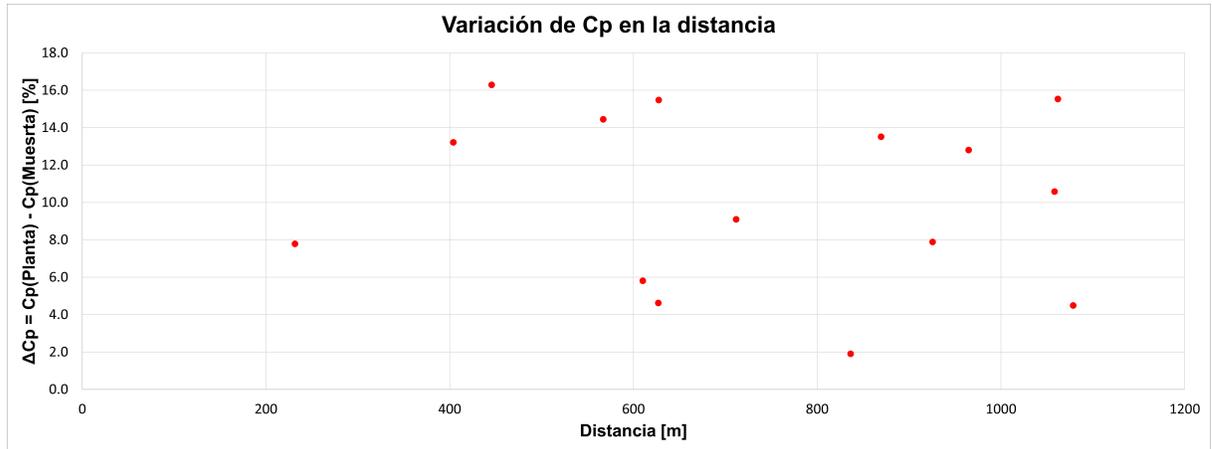


Figura 4.5: Variación del C_p según la distancia.

Además, resulta interesante observar la variación de C_p con respecto al C_p de planta (figura 4.6):

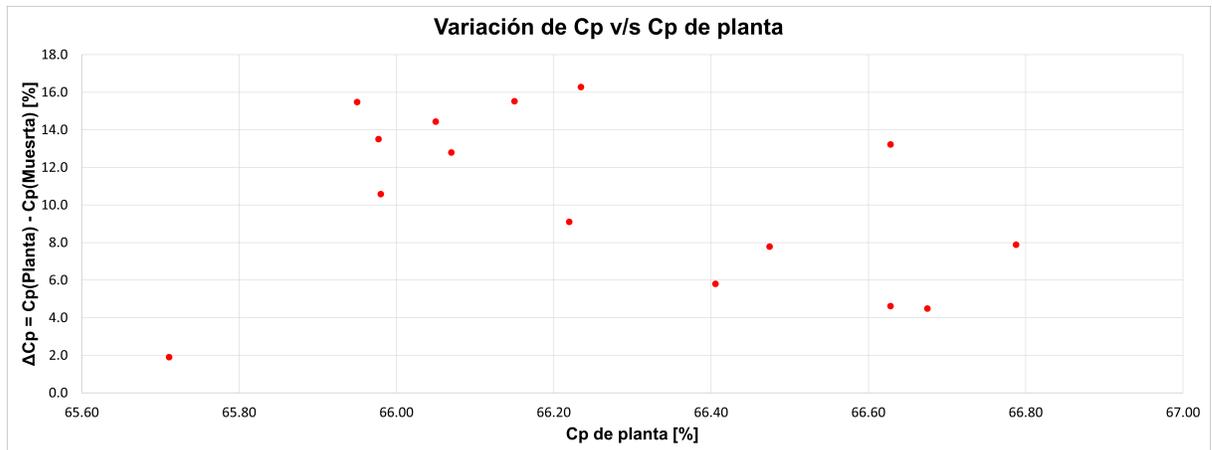


Figura 4.6: Variación del C_p según C_p de planta.

Sobre la densidad depositada, los resultados se presentan en la figura 4.7

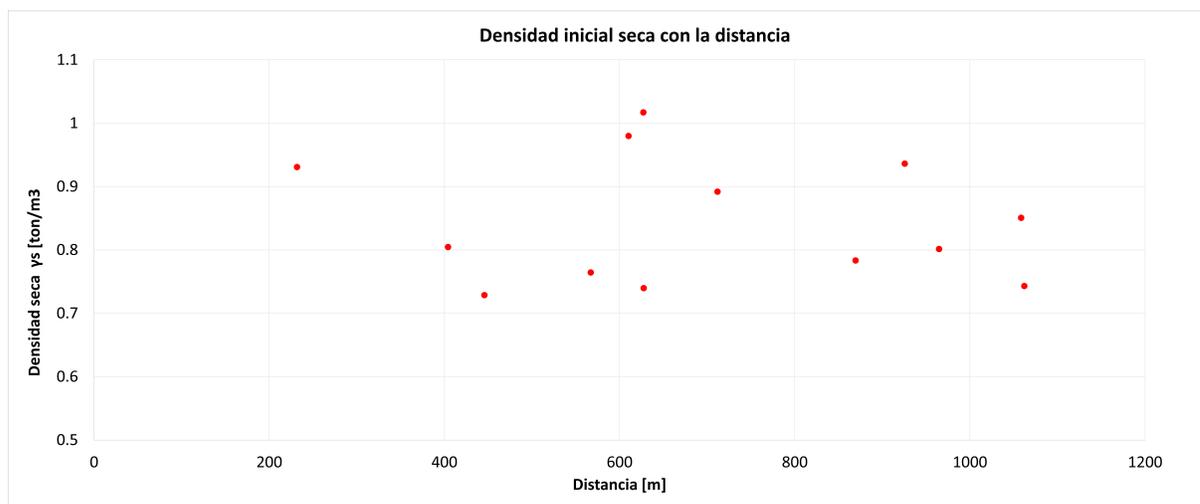


Figura 4.7: Densidad seca según distancia de deposición.

4.1.4. Resultados granulometría

En esta sección se analizará la variación de la granulometría del relave depositado en distancia con respecto a la granulometría en planta. En la figura 4.8 se observa la granulometría para los relaves en planta para la ventana de tiempo en la cual se tomaron cada una de las muestras.

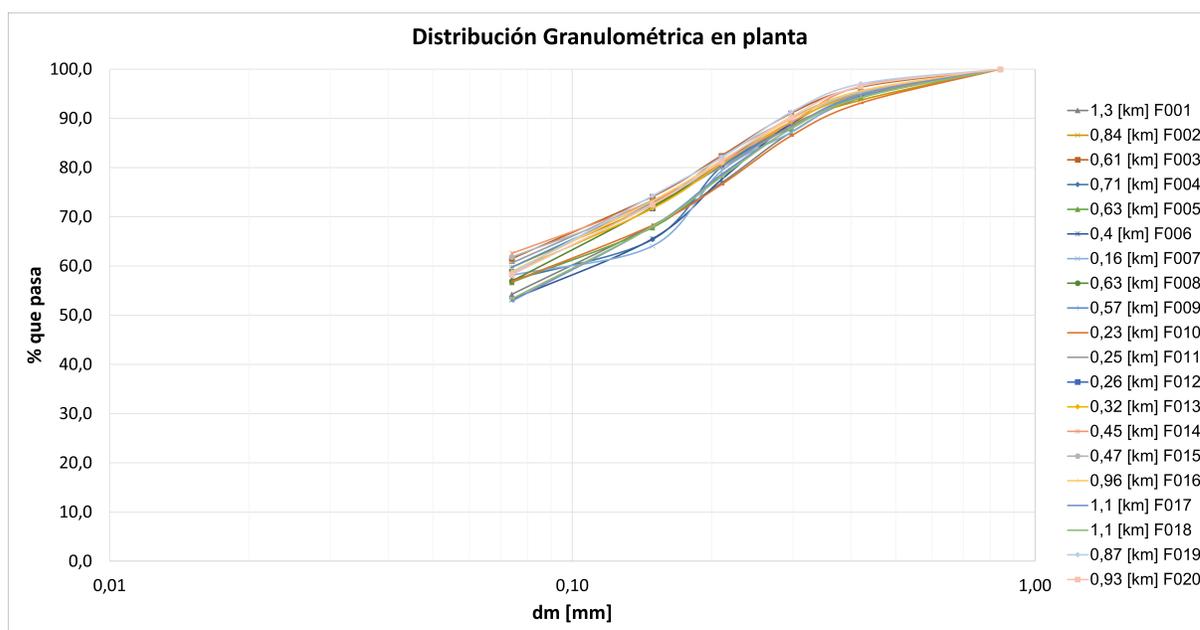


Figura 4.8: Granulometrías de relaves en planta.

Se observa que la banda granulométrica (figura 4.8) en la que se encuentra el relave en planta está bien definida, teniendo predominantemente un alto contenido de finos ($\geq 53\%$). Además, de la información extraída según el laboratorio de Centinela, los límites de Atterberg del relave, son en promedio:

Tabla 4.1: Promedio de límites de Atterberg para relaves producidos en Centinela.

L.L. [%]	L.P. [%]	I.P [%]	L.C. [%]
23.1	18.1	4	16.56

Dada la granulometría y los límites de Atterberg (tabla 4.1), el relave clasifica según USCS como un arcilla o limo de baja plasticidad (CL-ML).

A continuación, se presentan las granulometrías de las muestras tomadas:

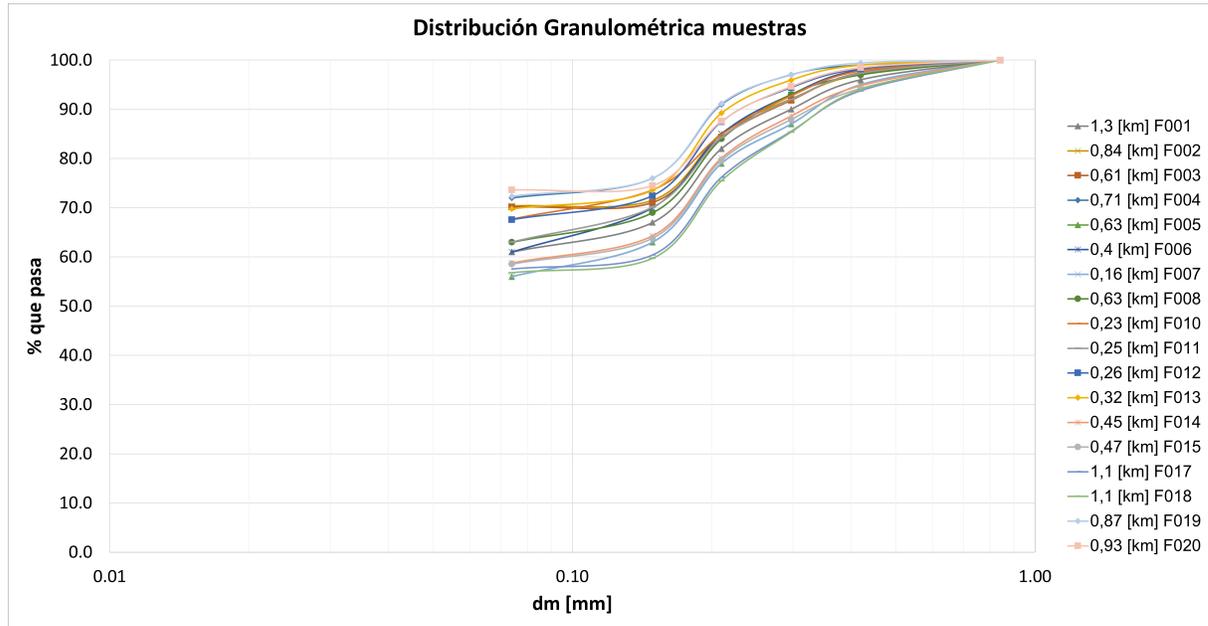


Figura 4.9: Granulometrías de muestras de relave tomadas en terreno.

Además, se incluyen ambos gráficos (figura 4.10), contrastando las granulometrías en planta con las de terreno.

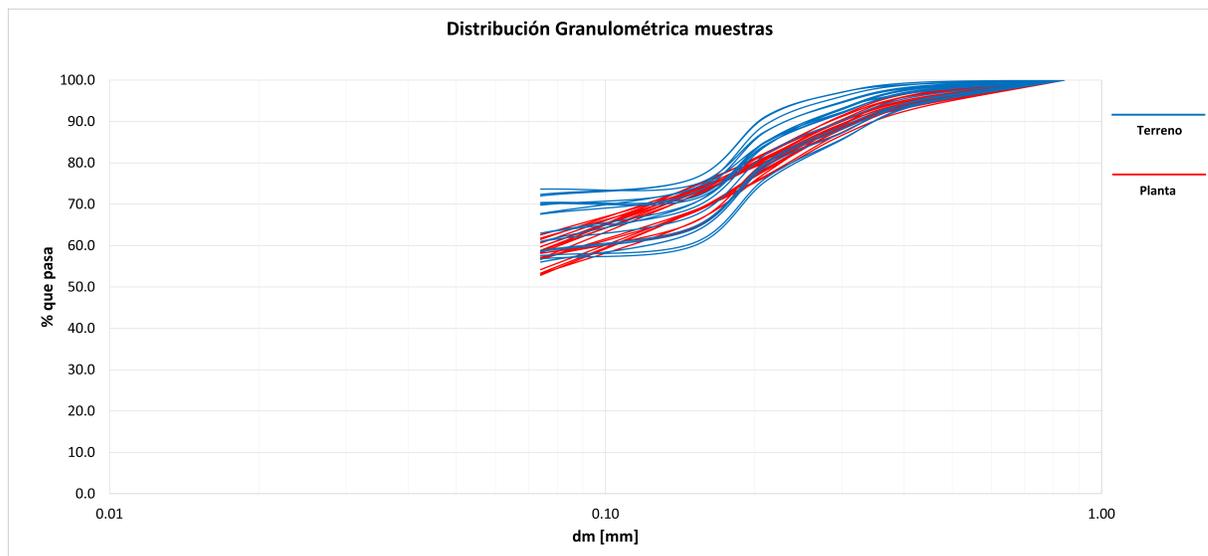


Figura 4.10: Granulometrías en planta y terreno.

Dado que se tiene un relave con alto contenido de finos, es de relevancia estudiar la segregación del mismo en la distancia, para esto, se presenta el gráfico del porcentaje de finos (figura 4.11).

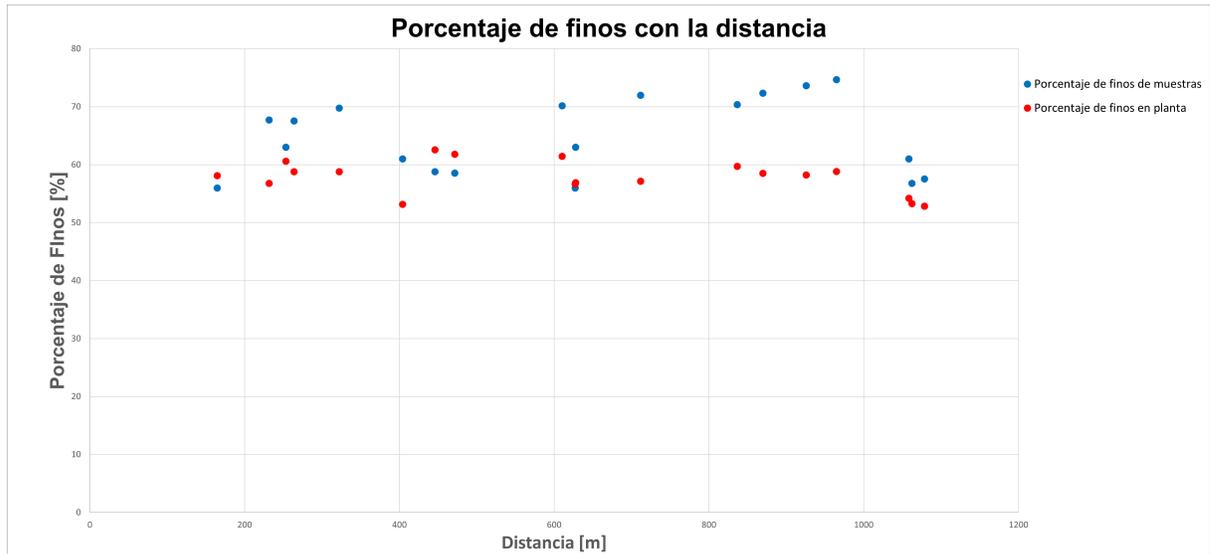


Figura 4.11: Porcentaje de finos de muestras tomadas en terreno y respectivamente en planta.

Definiendo la diferencia de porcentaje de finos como:

$$\Delta PF = PF_{Muestra} - PF_{Planta} \quad (4.2)$$

Donde:

- ΔPF [%]: Diferencia de porcentaje de finos
- $PF_{Muestra}$ [%]: Porcentaje de finos de muestra en terreno
- PF_{Planta} [%]: Porcentaje de finos en planta

Se presenta el gráfico de la diferencia de porcentaje de finos (figura 4.5), etiquetando los puntos según el C_p de planta:

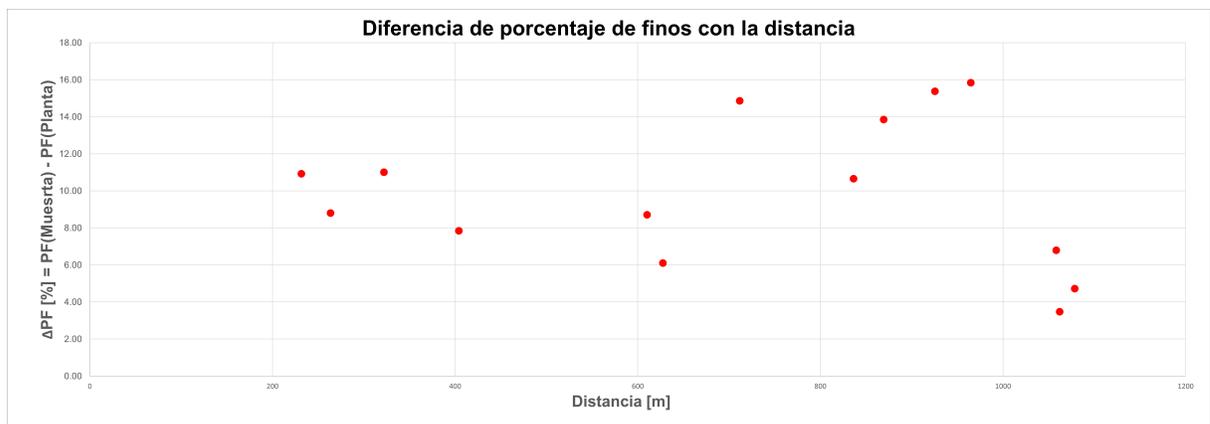


Figura 4.12: Diferencia de porcentaje de finos según la distancia.

4.2. Relave en proceso de consolidación y secado

Para esta sección se busca estudiar el secado y la consolidación del relave día a día una vez es depositado. Para relaves espesados la depositación es cíclica, se deposita en algún sector del depósito y posteriormente tal sector se vuelve inactivo para asegurar que el relave pueda consolidar y secarse con el objetivo de tener las resistencias requeridas en el diseño. Para estudiar este secado y consolidación día a día se realiza un seguimiento a una de las descargas del depósito. Inicialmente se dejó inactivo un sector en el depósito, posteriormente se descarga relave fresco una determinada cantidad de horas en una capa de relave depositado sobre una capa previa (figura 4.13).

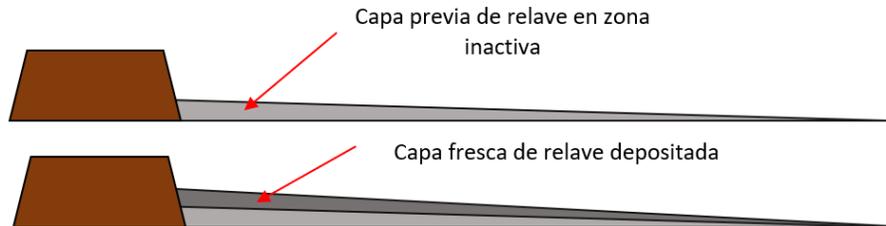


Figura 4.13: Capa previa y fresca de relave.

El seguimiento a la depositación se realiza de la siguiente manera:

- En el día de la depositación (día 1), antes de la depositación se ubica el sector donde ha estado inactiva la playa y se delimita un punto, aquí se toma un cono de arena de la capa previa depositada (figura 4.14). Esta medición tiene como objetivo registrar la humedad y la densidad que tiene la capa previa, entendiendo que una vez que se deposita relave fresco, esta capa se humecta, por lo cual la humedad que esta tiene previa a la depositación es un antecedente de relevancia.



Figura 4.14: Ensayo de cono de arena a la capa previa en día 1.

- Durante la depositación, cercano al punto donde se realiza el cono de arena se toma una muestra de C_p con el muestreador (humedad con la que llega el relave depositado). Este

dato representa el punto inicial en la curva de humedad en el tiempo. El relave fresco cubre la capa previa.



Figura 4.15: Izquierda: Muestreador situado a la espera de ser cubierto, Derecha: Muestreador cubierto con relave fresco.

- Para los días posteriores (1, 2 y 3), se toma una muestra con la metodología propuesta en esta memoria (altura de capa, densidad y humedad) a la capa fresca depositada. Además, se descubre esta capa depositada para tomar un cono de arena a la capa previa para poder conocer la rehumectación que tiene día a día.



Figura 4.16: Izquierda: Tubo introducido en la capa, Derecha: Medida de altura de capa.



Figura 4.17: Izquierda: Lámina situada en capa previa para realizar cono de arena, Derecha: Cono de arena.

4.2.1. Resultados evolución de densidad en el tiempo

En las figuras 4.18 y 4.19 se presenta la evolución de la densidad de la capa de relave depositada y previa según los días:



Figura 4.18: Densidad seca del relave fresco depositado y capa previa según el tiempo.

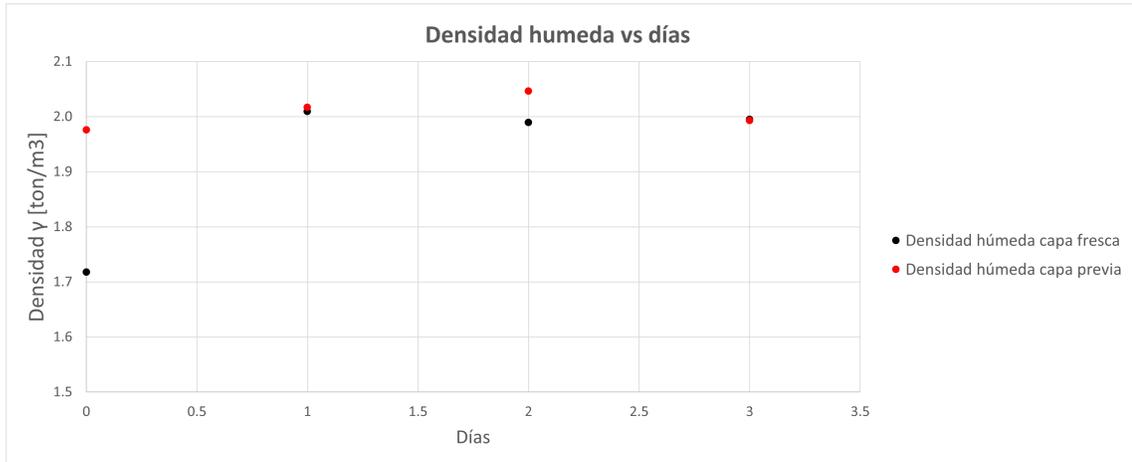


Figura 4.19: Densidad húmeda del relave fresco depositado y capa previa según el tiempo.

4.2.2. Resultados evolución de humedad en el tiempo

En las figura 4.20 se presenta la variación de la humedad de la capa de relave depositada y previa según los días:

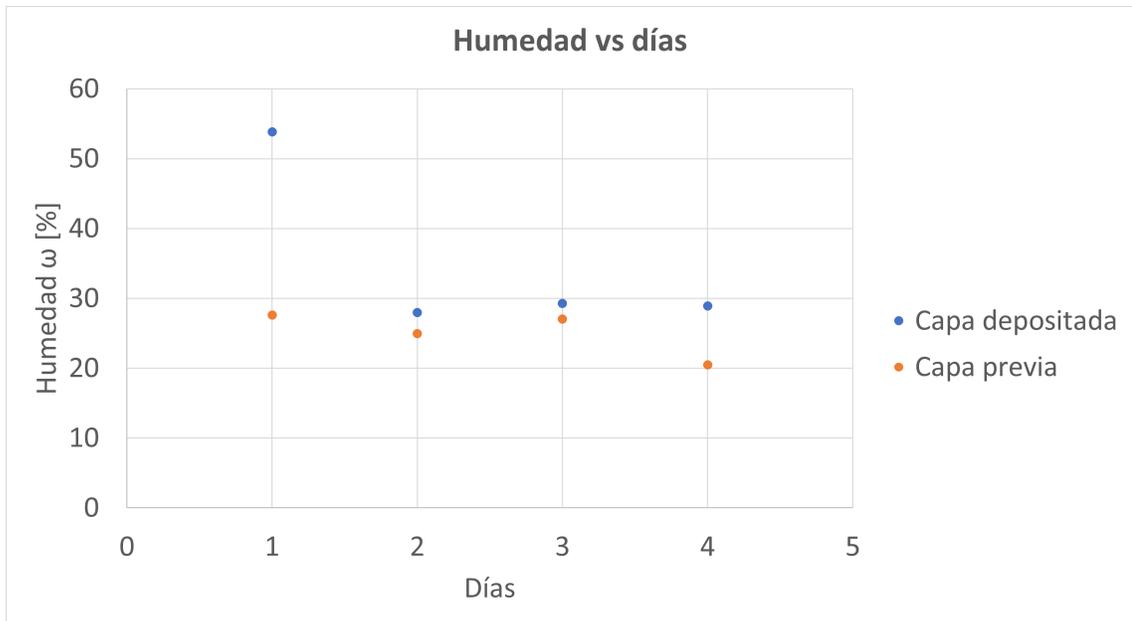


Figura 4.20: Humedad del relave fresco depositado y capa previa según los días.

4.2.3. Conclusiones sobre la campaña

En general, la campaña realizada sobre los ensayos fue satisfactoria, se realizaron 20 tomas de muestra de C_p , siguiendo el procedimiento propuesto en esta memoria, obteniendo resultados de granulometría y C_p del relave depositado en MC para diferentes distancias.

Primero, sobre los resultados de C_p se observa que existe una tendencia a la disminución

del C_p según la distancia (gráfico 4.5). No existe una función clara en cuanto a la tendencia en esta disminución debido a la dispersión de los puntos medidos. Esta dispersión se debe principalmente a la variabilidad de la producción de relaves y las condiciones geométricas variables del depósito.

En la figura 4.6 la disminución de C_p es inversamente proporcional a la concentración de sólidos en planta a la cual se produce el relave, mientras más concentrado esté el relave en planta, menos tenderá a disminuir su C_p en la distancia. Una conclusión directa de lo anterior es que se debe evitar, dentro de lo posible, las variabilidades en la operación de la planta, es deseable obtener un sólido más concentrado para disminuir las variaciones de C_p y que este sea lo más constante posible en planta, para estimar de mejor manera la forma en la que se depositará el relave. Junto a lo anterior, se deben tomar decisiones adecuadas cuando el sólido se encuentre excepcionalmente bajo en su concentración, pues esta condición puede afectar significativamente el sólido que se deposite, teniendo resistencias y pendientes de depositación distintas a las de capas previas.

Dado que existe una variación del C_p en la distancia y por lo tanto del índice de vacíos, existe una variación de la densidad seca depositada en la distancia (figura 4.7). Esta condición de la densidad seca es inicial durante la depositación (ocurre debido al transporte de sólidos durante la duración de la descarga), por lo cual para tiempos posteriores (durante el ciclo de secado) la densidad aumenta en el tiempo debido a la sedimentación, consolidación y secado del relave. Dado lo anterior, los ciclos de secado en las canchas deben considerar esta variación de la densidad en la distancia, lo más conservador sería considerar la menor densidad presente en la distancia (posiciones finales de la descarga) las cuales están asociadas a mayores contenido de humedad y por lo tanto, mayores ciclos de secado.

Las razones por las cuales disminuye el C_p en la distancia se abordarán en las siguientes secciones de este documento, pero se atribuye principalmente a la sedimentación del relave durante su depositación.

En cuanto a las granulometrías, se observa que existe una segregación baja, teniendo en promedio un aumento del 8% de finos en la distancia para el relave depositado.

Sobre los ensayos realizados al relave en proceso de consolidación y secado, se observa que la densidad del relave depositado aumenta en los días. El aumento de densidad se relaciona directamente con la humedad que tiene el relave, principalmente debido a que en esta fase del secado el relave se encuentra saturado. Aún así, existieron falencias en cuanto a la metodología propuesta, pues la altura de capa no se midió correctamente, en terreno esta magnitud se midió posteriormente se retiraba el cilindro, lo cual le quitaba sustento lateral al testigo, permitiendo su deformación y obteniendo una medición de la altura diferente a la real (estas variaciones se estiman del orden de un 10 [%] con respecto a la altura medida), esto se detectó posteriormente a la primera tanda de muestras. El impacto más significativo en esto es que los datos del volumen y por lo tanto la densidad de las muestras no son correctos y no se puede estimar el nivel de saturación que tienen día a día las muestras. Aún así, los datos de la capa previa muestran que esta se mantiene saturada durante los días en los cuales se muestreó, por lo cual se asume que la capa fresca depositada se mantiene saturada en las ventanas de tiempo medidas, con esto, se puede estimar la evolución de la densidad

únicamente con la evolución de la humedad. Aún así, se propone una metodología mejorada de muestreo para la evolución del secado y la consolidación, la cual por razones de tiempo no se pudo poner a prueba en terreno, en la cual la altura de capa se mide antes de retirar el cilindro, permitiendo obtener datos correctos sobre la evolución de la densidad y saturación.

Según los resultados de humedad, el relave al segundo día de ser depositado alcanza una humedad en torno al 28 %, estabilizándose con la humedad de la capa previa. Esta humedad significa una densidad seca de $1.6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$ en condición saturada. En los días posteriores, el relave se desatura, por lo cual se tiene una condición de sólido parcialmente saturado y en el secado toman relevancia otras variables como la costra salina y el gradiente de humedad entre capas.

Capítulo 5

Sedimentación de relave y CONDES0

Una de las principales variables que puede afectar la concentración en peso de sólidos durante la depositación corresponde a la sedimentación de los relaves. Para estimar la sedimentación del relave se utiliza el software CONDES0.

Dado que en la presente memoria no se consideran ensayos de permeabilidad y compresibilidad, se ejecuta una calibración según ensayos de sedimentación simples al relave, realizando una variación iterativa de los parámetros en CONDES0 hasta que las curvas de sedimentación coincidan.

El montaje experimental de los ensayos de sedimentación realizados considera un vaso precipitado graduado en el cual se deposita pulpa de relave a un C_p conocido, hasta una altura de control en el vaso. Para lo anterior, se consideran las siguientes configuraciones:

- Altura de capa de 3, 5 y 10 [cm]
- Concentraciones de 59, 63, 65 y 67 [%]

El objetivo de los ensayos es registrar la altura a la cual se encuentra la interfaz sólido-agua para diferentes tiempos, en una condición de drenaje simple (drenaje superficial), obteniendo una curva de sedimentación para las diferentes concentraciones de sólido propuestas. Para lo anterior, se registran los ensayos durante 1 hora con una cámara de video, con el objetivo de obtener una mayor precisión. Además, para los ensayos con altura 10 [cm] se registran datos después de las 10 horas de comienzo del ensayo, para obtener puntos en los cuales la curva de sedimentación se estabiliza.



Figura 5.1: Izquierda: Montaje experimental, Derecha: Vaso precipitado con pulpa de relave.

En la figura 5.2 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente para una capa de 10 [cm]. Los demás resultados se encuentran en el anexo D.

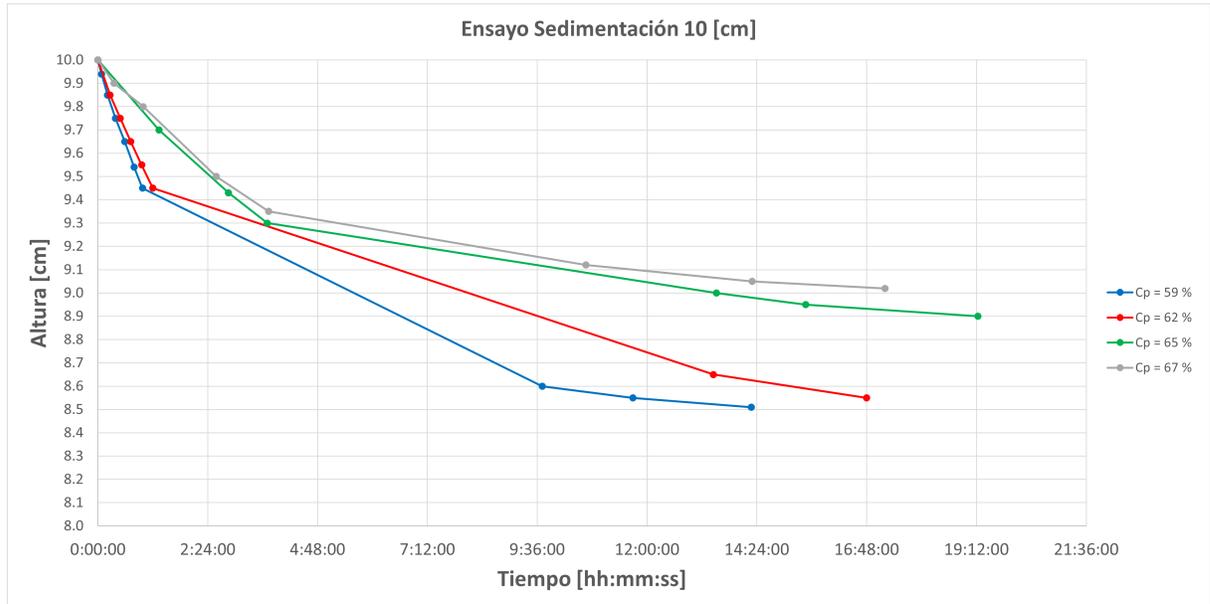


Figura 5.2: Ensayo de sedimentación de 10 [cm] para diferentes concentraciones de sólido.

En la figura 5.3 se muestra la comparación de los datos experimentales con los de CONDES0 calibrado para una concentración C_p 65 % y capa de 10 [cm]. Para las demás concentraciones ver el Anexo C.

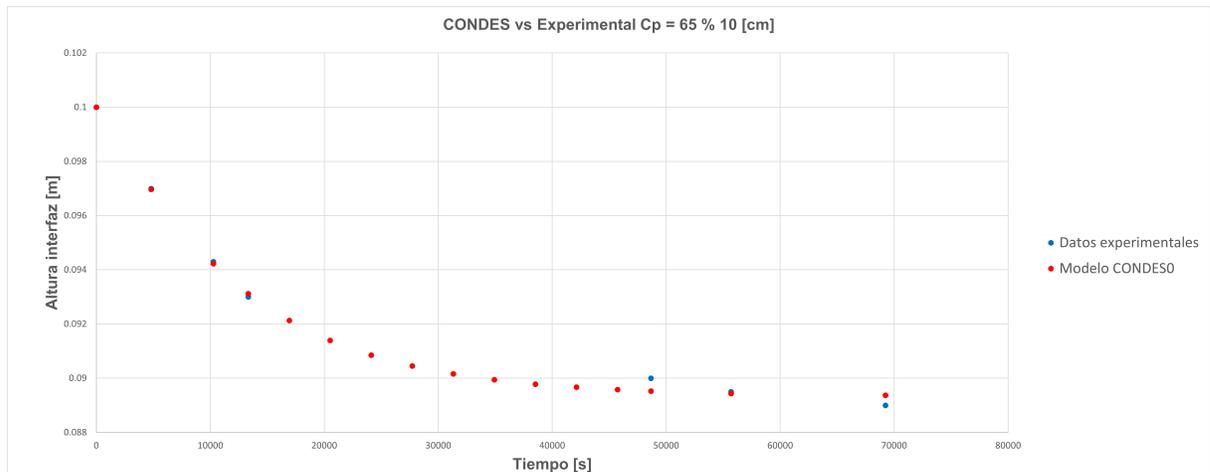


Figura 5.3: Experimental vs CONDES0 $C_p = 65\%$.

CONDES0 entrega otros resultados relevantes para la sedimentación de relaves, como lo es la distribución de índice de vacíos en la altura para diferentes tiempos (figura 5.4). Al conservar la condición saturada, esa distribución de índice de vacíos se puede relacionar directamente con una distribución del C_p (figura 5.5) según la ecuación 2.3.

A continuación se presenta la distribución de índice de vacíos para diferentes tiempos (figura 5.4).

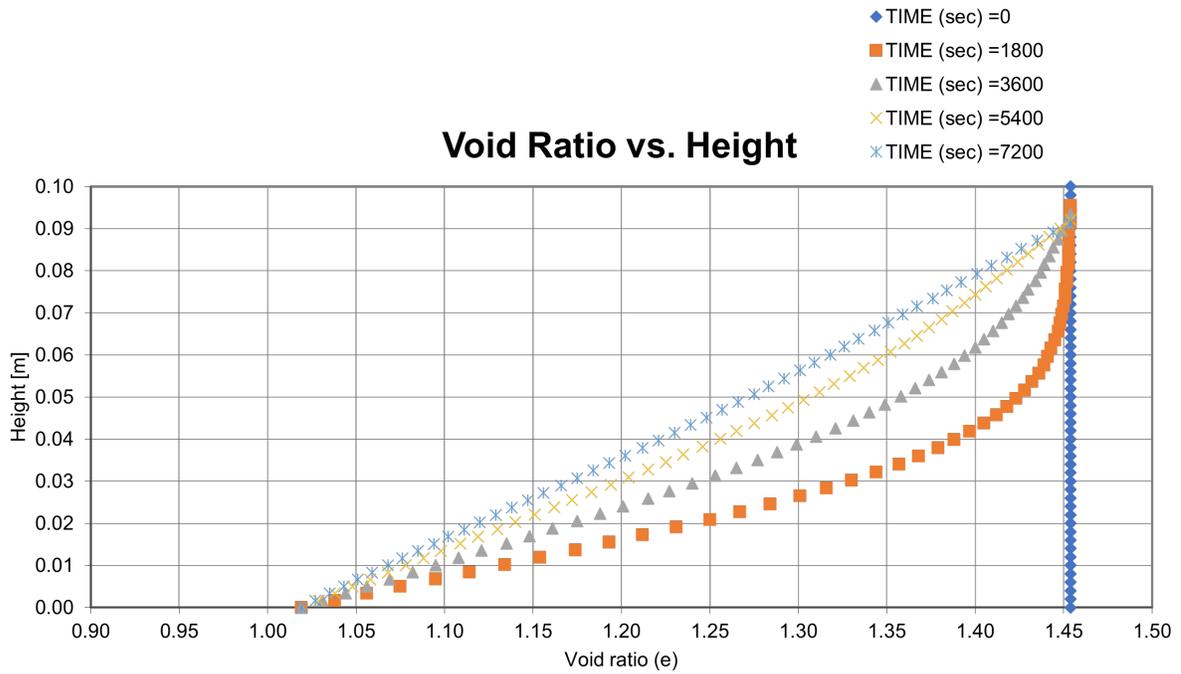


Figura 5.4: Distribución de índice de vacíos en la altura.

Con la distribución de índice de vacíos, se puede calcular el C_p en la altura (figura 5.5).

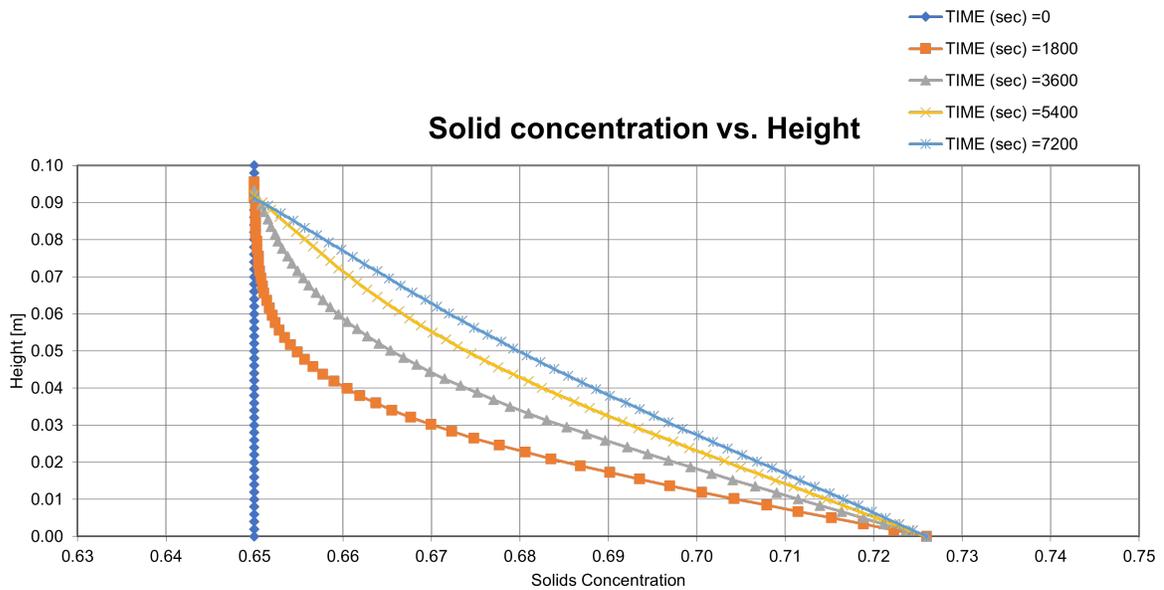


Figura 5.5: Distribución C_p en altura.

Finalmente, calibrado CONDES0 con los ensayos experimentales, los parámetros se muestran en la tabla 5.1. Estos parámetros permiten estimar la curva de compresibilidad (ecuación 2.12) y permeabilidad (ecuación 2.13).

Tabla 5.1: Parámetros calibrados de CONDES0 para relave de Centinela.

PARÁMETROS CONDES0	
A	1.08
B	-0.4
C [$\frac{m}{s}$]	$3 * 10^{-7}$
D	3

Capítulo 6

Modelo simplificado de secado y consolidación de relaves

En esta sección se analizará el secado y la consolidación de relaves posterior a su depositación. La simplificación del problema considera que a lo largo de la playa se mantiene el C_p .

Este modelo considera que los mecanismos con los cuales varía el contenido de humedad del relave es la sedimentación y la evaporación promedio del depósito ($3.6 \left[\frac{m}{año}\right]$) posterior a su depositación. Ambos mecanismos implican una velocidad de pérdida de columna de agua según el tiempo, para este modelo se consideran ambos mecanismos superpuestos.

Esta metodología toma como parámetros un espesor de capa y una concentración de sólidos en la descarga, con los que se debe estimar la curva de sedimentación para el relave. Se define la humedad inicial como:

$$\omega = \frac{h_{w0}}{h_s G_s} \quad (6.1)$$

Donde:

- h_{w0} : Altura de agua inicial según el espesor de capa
- h_s : Altura de sólido
- G_s : Peso específico de sólidos
- ω : Humedad inicial de la capa

Además, observar que se cumple:

$$C_p = \frac{h_s G_s}{h_s G_s + h_{w0}} \quad (6.2)$$

$$h = h_s + h_{w0} \quad (6.3)$$

Donde:

- h : Espesor de capa

Posteriormente, definiendo la altura de agua h_{w_i} para alguna hora i durante la depositación como

$$h_{w_i} = h_{w_{i-1}} - (V_{v_i} + E) * t \quad (6.4)$$

Donde:

- h_i : Altura de agua en la hora i
- h_{i-1} : Altura de agua en la hora anterior
- V_{v_i} : Tasa de liberación de agua para la hora i
- E : Evaporación
- t : Tiempo transcurrido (1 [h])

Así, la humedad para alguna hora i queda definida como:

$$\omega_i = \frac{h_{w_i}}{h_s G_s} \quad (6.5)$$

Una metodología de similares características puede utilizarse para otros relaves, calibrando adecuadamente la rutina CONDES0 según los parámetros de sedimentación, la concentración de sólidos de producción típica del depósito y el espesor de capa a considerar.

Para esta instancia, se considera una capa de 6 [cm] con un C_p de 65 %. La condición de drenaje simple o doble considera que el relave libera agua por su superficie o por su base y superficie simultáneamente. Los datos obtenidos para la tasa de liberación de agua se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Tasa de liberación de agua $h = 6$ [cm], $C_p = 65$ %.

	DRENAJE DOBLE	DRENAJE SIMPLE
Horas [h]	V_v [$\frac{cm}{hr}$]	V_v [$\frac{cm}{hr}$]
1	0.531	0.268
2	0.124	0.167
3	0.039	0.1
4	0.014	0.062
5	0.004	0.039
6	0.002	0.026
7	0	0.017
8	0.001	0.012
9	0	0.007

Es interesante ver que, comparando con la evaporación diaria (0.041 [$\frac{cm}{h}$]), los valores de la liberación de agua son 1 orden de magnitud mayor para las primeras 3 horas en el caso de drenaje doble y 5 horas para el drenaje simple. Esto quiere decir que el cambio en el contenido de agua (humedad) del relave durante las primeras horas de la depositación son dominadas por la sedimentación, en comparación a la evaporación.

Gráficamente esta comparación de las velocidades de sedimentación y evaporación se observa en la figura 6.1.

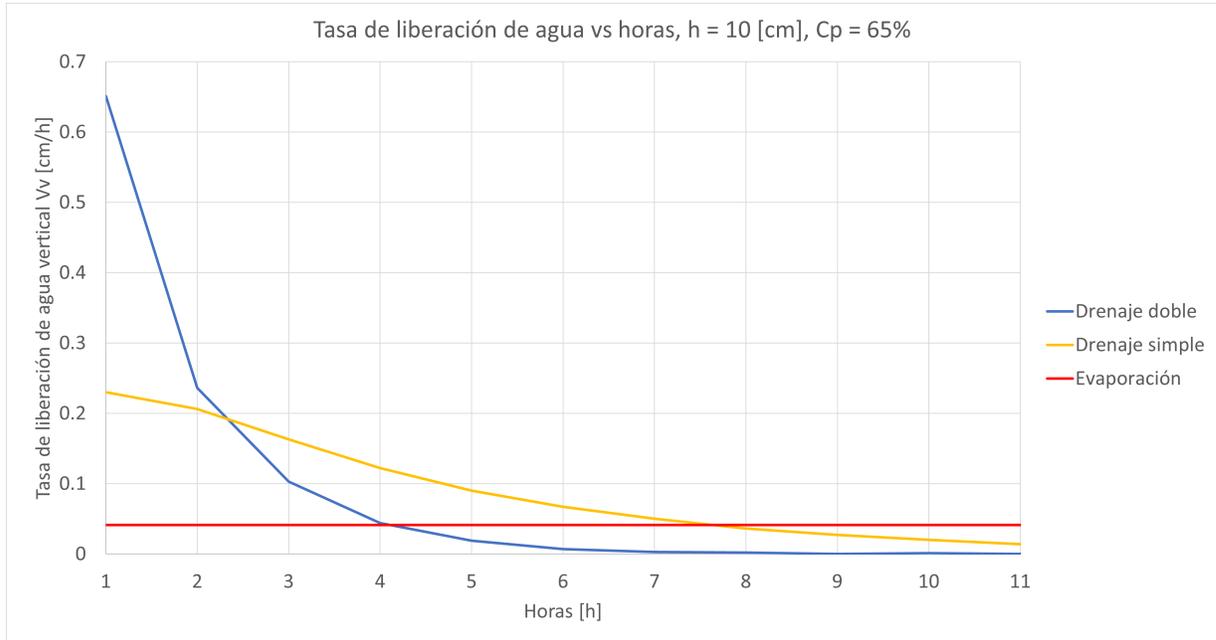


Figura 6.1: Liberación de agua sedimentación vs evaporación, $h = 6$ [cm], $C_p = 65\%$.

Para obtener la evolución de la humedad diaria, se consideran ambos efectos superpuestos, la sedimentación y la evaporación para cada hora (figura 6.2)

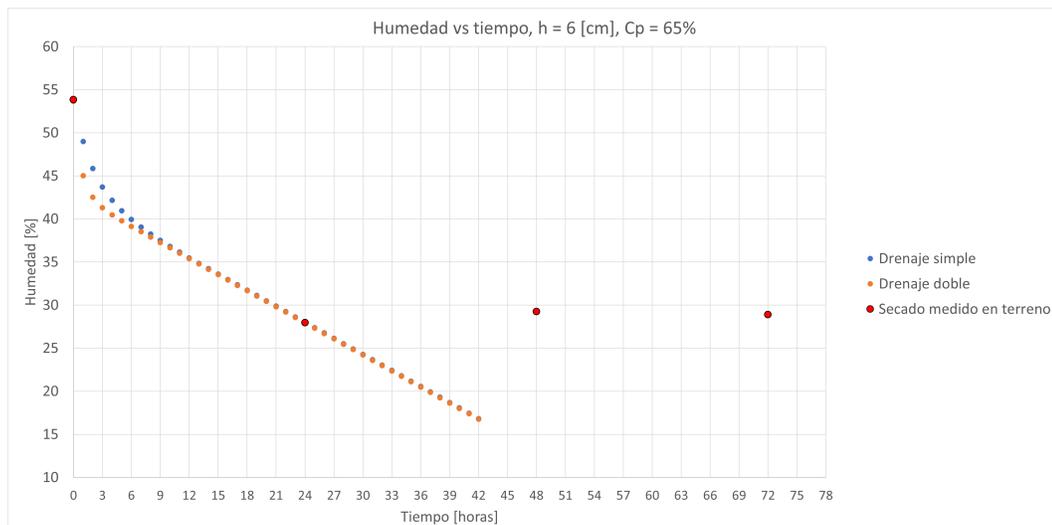


Figura 6.2: Humedad vs tiempo depositado del relave, $h = 6$ [cm], $C_p = 65\%$.

Se observa que para las primeras horas existe un rápido cambio en la humedad debido a la sedimentación del relave, teniendo un mayor impacto para el caso de drenaje doble. Esto es intuitivo pues al tener una mayor posibilidad de drenaje, la liberación de agua es mayor. A las 8 [h] las curvas para ambos drenajes se igualan y controla la pendiente dada por la

evaporación (lineal). Además, a las 24 [h] se tiene una humedad del relave cercana al 28 %, lo cual se verifica con los resultados de las muestras tomadas en terreno. La linealidad de la curva de secado se mantiene hasta el límite de contracción, luego, al desaturar, la pendiente de la variación de la humedad versus el tiempo es cada vez menor.

Se observa que a partir de las 24 [h] el relave en terreno prácticamente no sigue cambiando su contenido de humedad, esto puede deberse principalmente a la estabilización de la humedad con la capa previa o la formación de la costra salina en superficie que suprime el efecto de la evaporación.

6.0.0.1. Secado para capas más gruesas

A continuación, se mostrará la condición de secado que se tendría con una capa de 10 [cm] (figura 6.3) y 15 [cm] (figura 6.4) sobre la evolución del contenido de humedad.

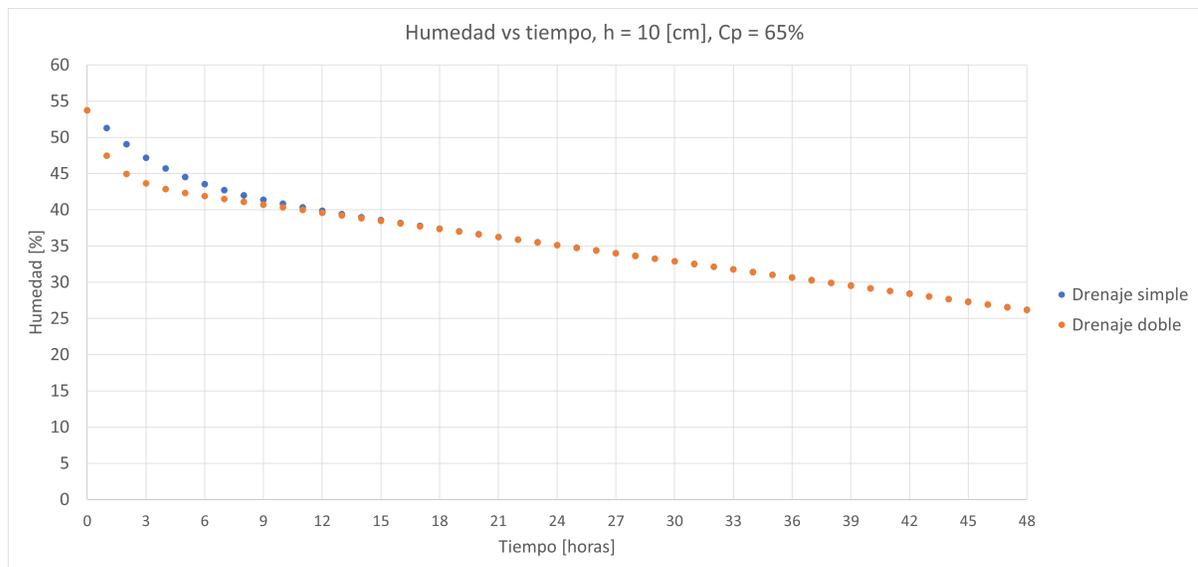


Figura 6.3: Humedad vs tiempo depositado del relave, h = 10 [cm], $C_p = 65\%$.

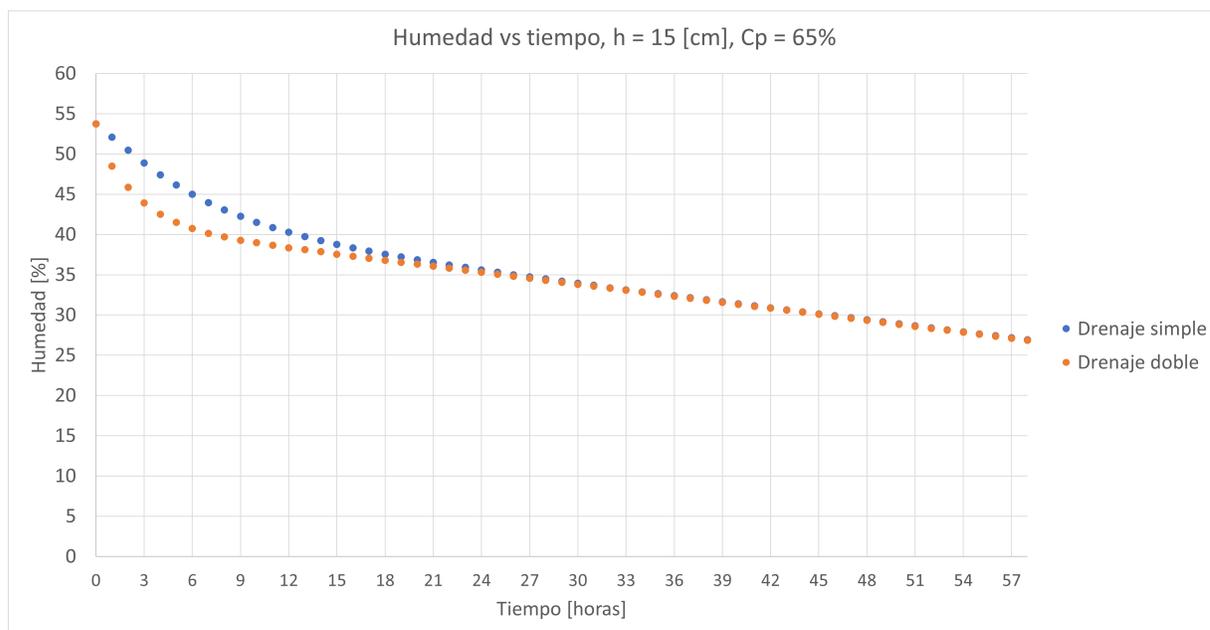


Figura 6.4: Humedad vs tiempo depositado del relave, $h = 15$ [cm], $C_p = 65\%$.

Se verifica que al aumentar el espesor de capa cambia sustancialmente las condiciones del ciclo de secado a aplicar. Con el objetivo de llegar al 28% de humedad de la capa previa, en el caso de una capa de 10 [cm], se debe dejar inactiva la playa durante 42 [h], mientras que para una capa de 15 [cm] se deben esperar 51 [h].

6.0.1. Índice de vacíos y densidad

A continuación se analizará la evolución del índice de vacíos y de la densidad por el efecto del secado y la consolidación posterior a la depositación del relave. Este análisis se realizará asumiendo que en las primeras 24 [h] del secado el relave se mantiene saturado, por lo cual, de la ecuación 6.6, se puede obtener el índice de vacíos según la humedad para diferentes tiempos, utilizando la curva de secado propuesta para la evolución de la humedad. Este resultado se observa en la figura 6.5.

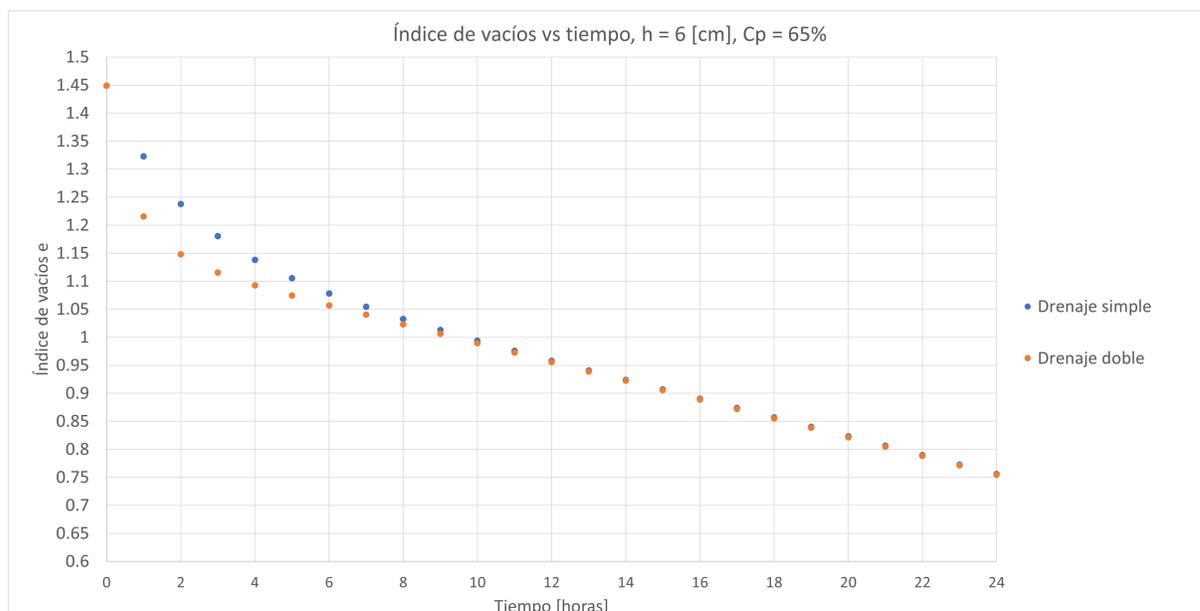


Figura 6.5: Modelo evolución del índice de vacíos del relave depositado.

Además, sabiendo la relación entre la densidad seca y el índice de vacíos (ecuación 2.5), se puede calcular la densidad seca en función del índice de vacíos. La evolución de la densidad seca en el tiempo durante el secado y la consolidación se muestra en la figura 6.6.

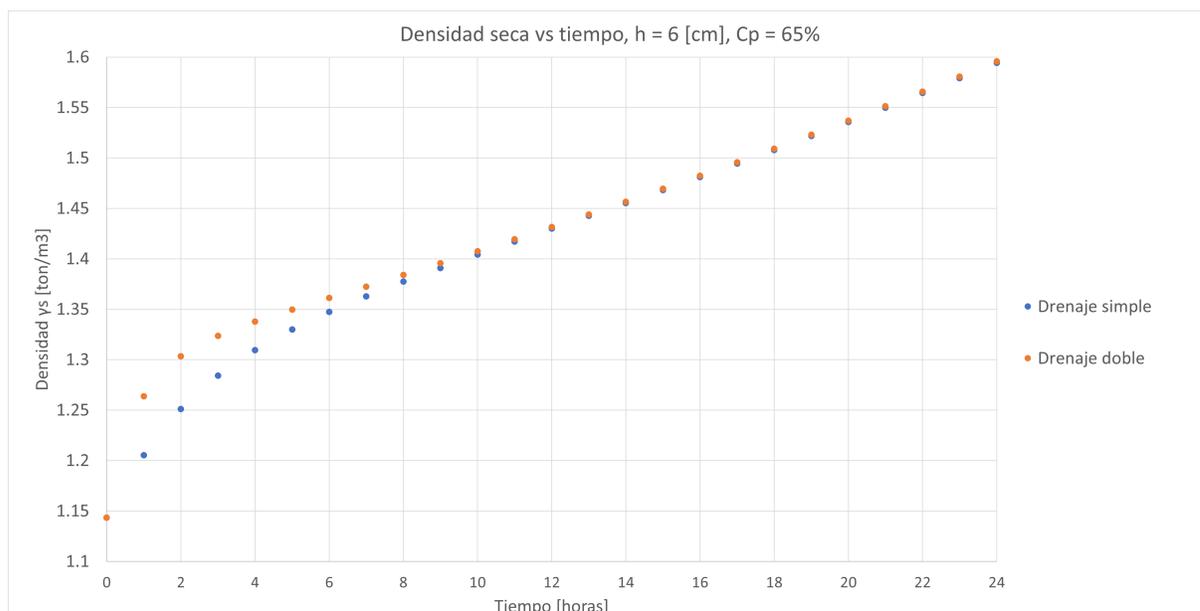


Figura 6.6: Modelo evolución de la densidad seca del relave depositado.

6.0.2. Saturación

Si se busca desaturar el relave, el ciclo de secado debe ser mayor a un día, pues con un día basta para llegar a valores cercanos al límite de contracción en condición saturada. A partir de este momento, la humedad de la capa nueva se estabiliza con la capa previa y el análisis a realizar es diferente, pues la saturación del relave deja de ser 1. La estrategia para continuar

estimando el secado de relave corresponde a un análisis de sólido parcialmente saturado, el cual será realizado en esta sección.

Se abordará una metodología simplificada para estimar el tiempo de secado en el relave necesario con tal de llegar al 80 % de saturación. El 80 % de saturación tiene como objetivo favorecer el comportamiento drenado en la respuesta mecánica del relave.

Se considerará el secado de una capa individual de relaves, sin la presencia de capas previas u otros factores que puedan afectar la evolución de la humedad de la capa.

Cuando se alcanza el límite de contracción, la saturación deja de ser 1, por lo cual se debe analizar el relave como parcialmente saturado. Para el secado la principal implicancia de esto es que la evaporación real deja de ser igual a la potencial, por lo cual el secado a analizar se considerará en dos fases, esto es, el tiempo necesario para llegar al límite de contracción y posteriormente el tiempo necesario para llegar a la saturación del 80 %.

- Como se analizó en la revisión bibliográfica, el secado presenta dos mecanismos, la sedimentación (liberación de agua) y la evaporación.
- Se debe conocer el límite de contracción del relave (límite de contracción). Para el relave de Centinela resulta ser 16.56 % (tabla 4.1).
- Se considerará que la evaporación potencial se mantiene igual a la de sitio hasta el límite de contracción ($E = 0.041 [\frac{cm}{h}]$). Posteriormente, la evaporación disminuye pues existe un mecanismo de fases dada la condición parcialmente saturada. Con el objetivo de simular este efecto, se considerará un análisis paramétrico, asumiendo que la evaporación disminuye entre 30 % a 50 %.
- El objetivo es, primero, contabilizar el tiempo que se debe secar hasta el límite de contracción y posteriormente el tiempo desde el límite de contracción hasta la humedad objetivo que asegura el 80 % de saturación.

El límite de contracción indica el punto en el cual el volumen deja de disminuir si se continua secando el relave. En este punto la saturación deja de ser igual a 1 y en los vacíos comienza a ingresar aire. Para Centinela, se calcula primero el índice de vacíos al cual se llega hasta el límite de contracción.

$$Se = G_s \omega \quad (6.6)$$

Evaluando para e con $S = 1$, $G_s = 2.8$ y $\omega = LC = 16.56 \%$

$$e = \frac{G_s \omega}{S} = \frac{2.8 \cdot 16.56 \%}{1} = 0.463 \quad (6.7)$$

Como dato, es interesante ver que $e = 0.463$ corresponde a un relave con $C_p = 86 \%$

Posteriormente, el índice de vacíos se mantiene igual pues no existen variaciones volumétricas posteriores al límite de contracción. Con lo cual evaluando la ecuación 6.6 para ω (humedad objetivo) con $S = 0.8$, $G_s = 2.8$ y $e = e_{LC} = 0.447$.

$$\omega_{objetivo}[\%] = \frac{Se}{G_s} \cdot 100 = \frac{0.8 \cdot 0.463}{2.8} \cdot 100 = 13.23\% \quad (6.8)$$

Finalmente, conociendo los puntos en el secado en los cuales la evaporación cambia, se construye una curva de secado (figura 6.7). La curva de secado considera en el primer tramo el efecto de la sedimentación y la evaporación, siendo la evaporación igual a la de sitio. Posteriormente la pendiente (velocidad de secado) cambia debido a la condición parcialmente saturada.

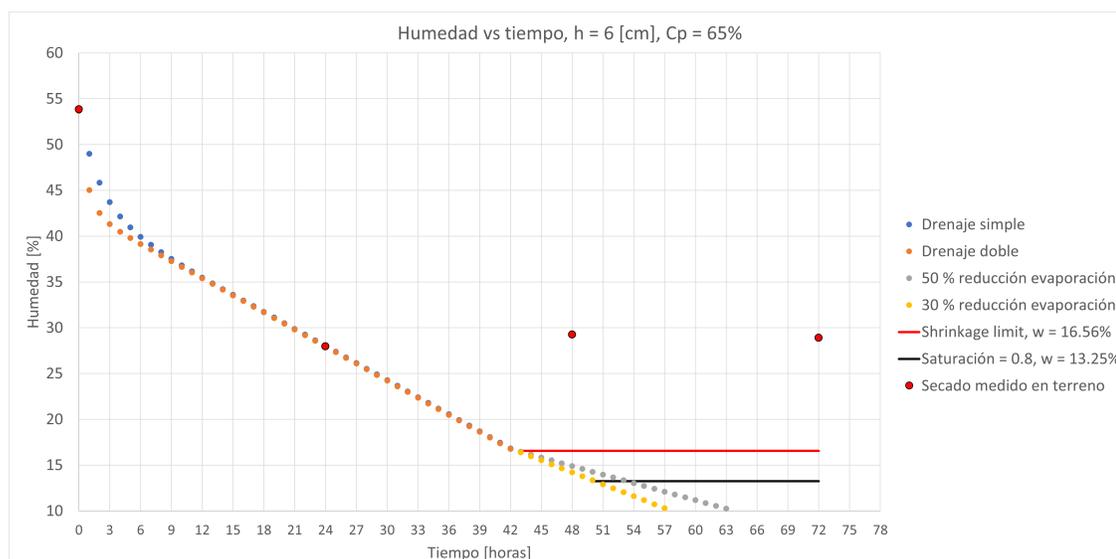


Figura 6.7: Curva de secado hasta 80% de saturación.

Se observa que para obtener el 80% de saturación en una capa de 6 [cm] con C_p inicial de 65%, se debe secar entre 51 a 53 horas, considerando una disminución de la evaporación entre el 30 al 50%, respectivamente, posterior al límite de contracción.

6.0.3. Ciclos de secado

Con la información recopilada sobre la evolución de la humedad, índice de vacíos y densidad seca se estimarán los ciclos de secado requeridos para obtener condiciones favorables para una depositación cíclica del relave, promoviendo que el punto inicial de la depositación permita que para confinamientos mayores del relave (aumento en la carga vertical debido a nuevas capas depositadas) se favorezca el comportamiento dilatante del material (ver el análisis para la figura 2.2). Para esto, se analizarán los ensayos triaxiales realizados en la campaña geotécnica ejecutada por Golder.

Primero, como antecedente, los ciclos de secado actuales aplicados en Centinela son de entre 10-12 [h], para estos ciclos de secado se observan las siguientes características para el índice de vacíos, saturación, humedad, G_s , esfuerzo vertical y densidad seca en profundidad (figura 6.8). Estos resultados provienen de muestras en profundidad tomadas con MOSTAP.

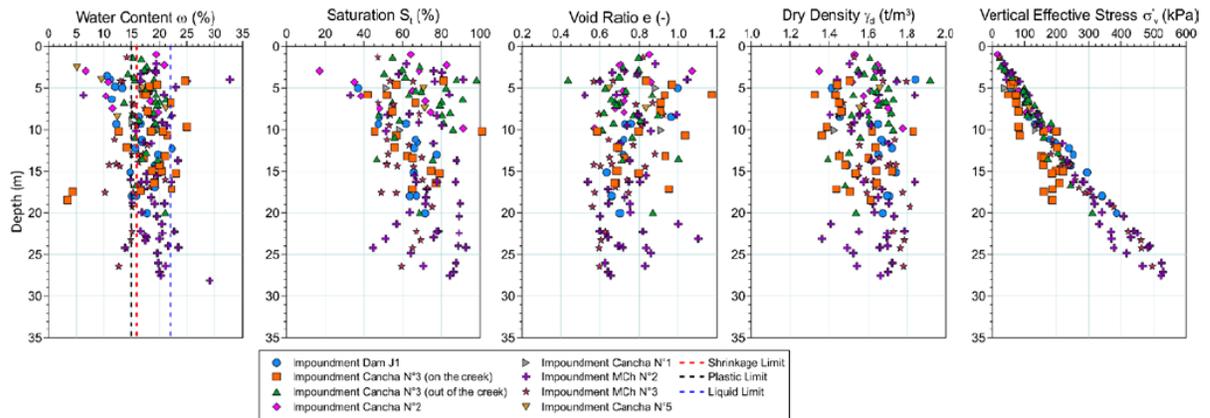


Figura 6.8: Ensayos realizados a las muestras MOSTAP tomadas por Golder en el depósito de relaves de Minera Centinela. Humedad, Saturación, Índice de vacíos, Densidad seca y Esfuerzo vertical en profundidad.

Se observa que en profundidad los valores de la saturación S se mantienen en torno al 80 %, el contenido de humedad ω al 20 %, el índice de vacíos e al 0.8, la densidad seca γ_s al $1.6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$ y el esfuerzo vertical es creciente en la profundidad.

En cuanto a los triaxiales, los resultados se observan en la figura 6.9.

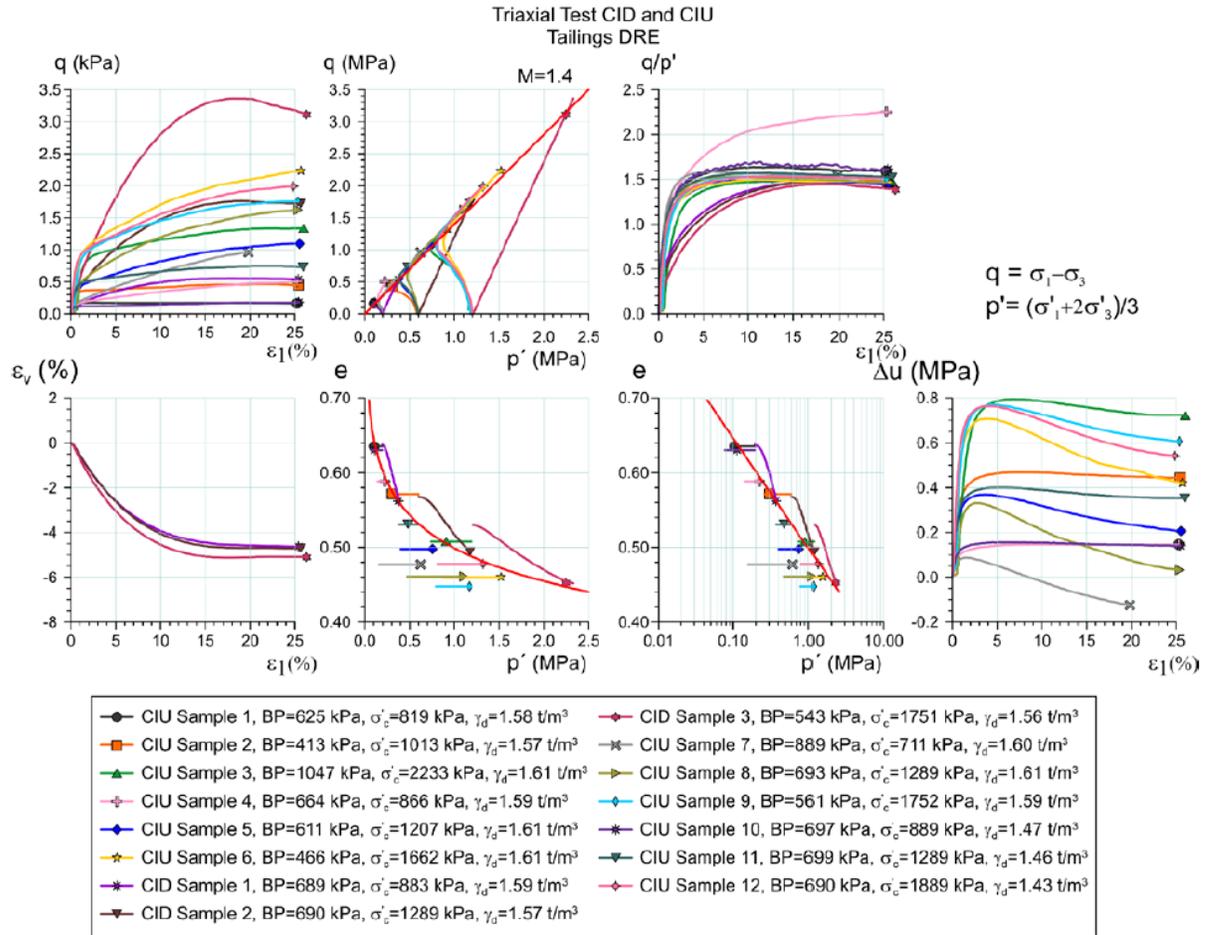


Figura 6.9: Trayectorias obtenidas de los ensayos triaxiales CID y CIU en la campaña geotécnica de Golder en el depósito de relaves de MC.

El principal resultado de los ensayos triaxiales es que para densidades cercanas a $1.6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$, el relave tiende a tener un comportamiento ligeramente dilatante, por lo cual parece adecuado este criterio de densidad para los ciclos de secado a aplicar. De los MOSTAP, se observa en general esta condición se cumple en profundidad, pero para aumentar la certeza de esta condición, se observa como adecuado promover ciclos de secado que permitan una densidad seca superficial de $1.6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$. Para esto, observando la figura de la evolución de la densidad en el tiempo (figura 6.6), a las 24 [h] de la depositación se tiene una densidad cercana a los $1.6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$. En esta condición el relave seguiría estando saturado, con una humedad ω del 28 % y un índice de vacíos del 0.784. Por lo tanto, idealmente los ciclos de secado a aplicar deben ser de 24 [h] para una capa de 6 [cm] y una concentración en la descarga de 65 %, como se indicó en la sección anterior, este tiempo será mayor para capas más gruesas y menor si se descarga con un C_p más concentrado (menor humedad e índice de vacíos inicial). Para tener una mayor certeza de este resultado se recomienda realizar ensayos de secado antes de las 24 [h], pero sin embargo se observa que con los ciclos de secado de Centinela, a las 12 [h], el relave tendría una densidad de $1.4 \left[\frac{t}{m^3} \right]$.

Capítulo 7

Deposición de relaves y variación de C_p

7.1. Deposición de relaves

En esta sección se explicará la manera en la que se depositan relaves espesados y cómo actúa la sedimentación. Se ilustra con figuras la deposición continua de una capa fresca de relaves. Es de relevancia hacer notar que se esquematiza un proceso continuo mediante una discretización.

En la figura 7.1 se tiene una playa inactiva, previamente seca. Las grietas aseguran el estado seco y que posteriormente el relave a depositar fluirá como sheet flow (régimen laminar). De no presentar grietas, el relave podría canalizar debido a que el esfuerzo que aplica el nuevo flujo removería el lecho dado que la capa previa no estaría lo suficientemente seca para resistir el nuevo flujo. Además se esquematiza un muro de contención donde está situado el spigot de descarga.



Figura 7.1: Playa inactiva.

En la figura 7.2 el relave fluye como sheet flow, en pequeñas capas que viajan una por sobre otra (figura 7.3). Sucesivamente inunda la superficie, llenando las grietas.



Figura 7.2: Playa activa, relave escurriendo.



Figura 7.3: Transporte de relaves y depositación.

El relave continua fluyendo, progresivamente inundando una mayor superficie.



Figura 7.4: Relave continua escurriendo.

En la figura 7.5 se esquematiza la depositación ejemplificando una distancia de 1 [km].

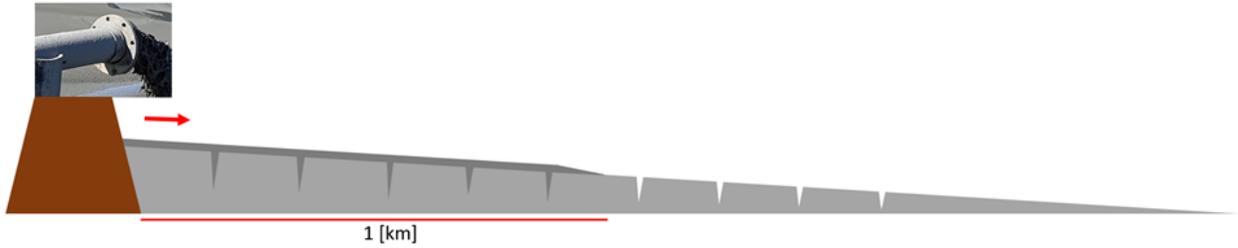


Figura 7.5: Relave cubre el kilómetro.

En la figura 7.6 el relave progresivamente libera agua en su escurrimiento debido a la sedimentación (bleeding). La sedimentación ocurre desde el inicio de la depositación, pero para tiempos mayores y por lo tanto, mayores distancias, adquiere una mayor relevancia pues los relaves que primero se depositan han permanecido por un tiempo considerable sedimentando y liberando agua. Los relaves que se depositan durante la misma tanda pero para tiempos mayores deben recorrer tales distancias por sobre una superficie húmeda.

También, es de relevancia que los relaves que primero se depositan tienen un mayor tiempo de sedimentación que los que se depositan al final, así, si por ejemplo se tiene una depositación de 6 horas continuas, habrán relaves que sedimentan 6 horas, otros 5 horas, hasta algunos que sedimentan 2 y 1 hora.

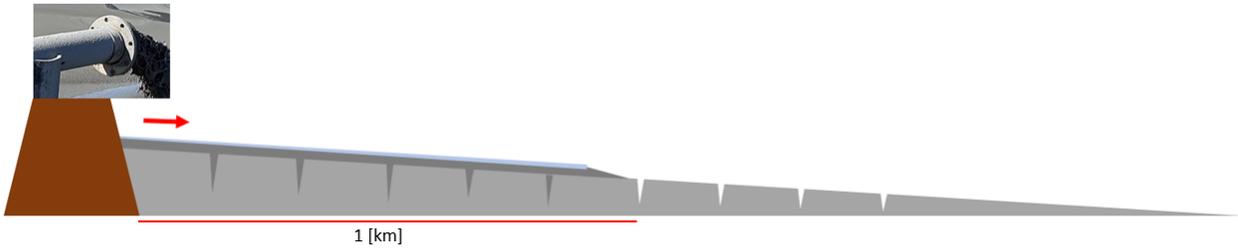


Figura 7.6: Relave libera agua.

El proceso continua, esta vez, se esquematiza que el relave que llega a más de un kilómetro viaja por encima de una película de agua liberada por los relaves que se depositaron previamente. Durante el escurrimiento ocurre un proceso de mezcla con 2 fases del relave, el relave que fluye en la depositación, y la segunda fase de relave ya depositado que se puede entender como una película de agua liberada por la sedimentación y un relave ligeramente más concentrado en la zona más superficial o simplemente un relave superficial más acuoso.

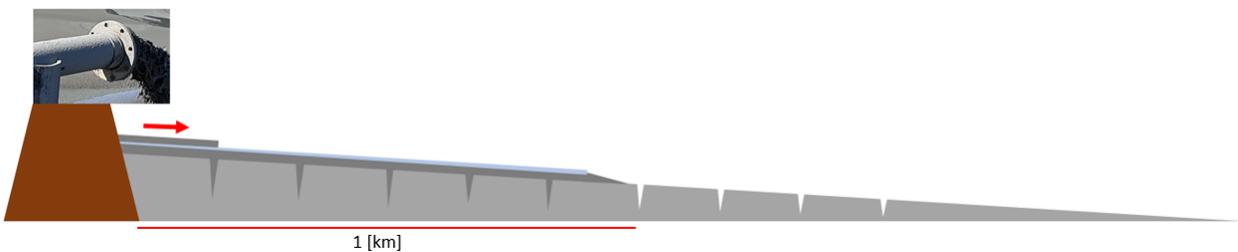


Figura 7.7: Nueva capa de relave es depositada.

7.2. Modelo de variación del C_p

Como se explicó en la sección anterior, este modelo de variación del C_p propone que el principal mecanismo por el cual varía el C_p en la distancia es la ganancia de agua por parte del flujo de relave mediante la sedimentación del relave que primero se deposita en una misma tanda de descarga. El relave que se descarga, a pesar de estar en un clima árido, se enfrenta a una superficie de relaves saturada, que está liberando agua en su superficie, estando como pulpa recién depositada (relave menos denso en superficie y más denso en su base), por lo tanto a este nuevo relave depositado desde el spigot, le espera mezclarse con el agua de bleeding y con relaves menos densos que están en la superficie recién depositada. Esto explica que el C_p depositado se reduzca con la distancia en la descarga. El proceso de mezcla (ondas) empuja los relaves mas acuosos más lejos.

En la depositación, con respecto a la humedad del relave, se observa que en las primeras horas la columna de agua presente en el relave disminuye en un orden de magnitud más debido a la sedimentación en comparación a la temperatura, incluso estando en el desierto. Esta agua liberada produce que la zona más superficial del relave sea más aguada, siendo transportada por el relave depositado aguas abajo mediante una mezcla.

Así, se considerará como el principal mecanismo de variación de C_p el aumento de la masa de agua en la distancia.

Conceptualmente, este modelo considera que el relave que primero se deposita sedimenta proporcionalmente al tiempo que permanece en terreno. Este mecanismo implica, además, que el flujo de relaves se vuelve más acuoso y también, que el relave que primero se deposita adquiere mayores densidades a medida que pasa el tiempo.

El desarrollo del modelo anteriormente propuesto admite diversos enfoques, el más completo tendría un enfoque de transporte de sólidos, considerando que el relave se ‘apila’ durante la depositación. Esta ‘pila’ de relave se produce debido al esfuerzo de corte con que responde frente a su desplazamiento, eventualmente, esta fuerza resistiva no es capaz de sostener la pila formada dada la nueva acumulación de flujo, fluyendo nuevamente aguas abajo. Durante este tiempo de acumulación, el relave sedimenta, liberando agua, con lo cual este relave más acuoso sumado al agua, escurre aguas abajo y lo que queda en el lecho, corresponde al relave que se depositó, sedimentando lo suficiente como para densificarse y no fluir. Este fenómeno se puede apreciar en terreno, pues la depositación de relaves sigue un pulso de ondas.



Figura 7.8: Ondas de relave en terreno.

Para entregar una aproximación de este fenómeno, se considera un modelo holístico basado en las siguientes consideraciones:

- Depositación continua por una cantidad n de horas. Para este caso se consideran 6 horas de depositación continua.
- Se considera una playa de relaves de espesor 10 [cm] y 300 [m] de ancho.
- El largo de la playa varía dependiendo de las condiciones geométricas del depósito (existencia del primer pretil que delimite la playa). Para este caso, se considera una playa de 1 [km] de largo, valor similar a las playas más largas en Centinela.

El procedimiento para obtener el modelo de la variación del C_p es el siguiente:

1. La playa se divide en un número de tramos iguales. Esto busca discretizar la playa en su largo (figura 7.9). Para este caso se consideraron 24 tramos iguales.

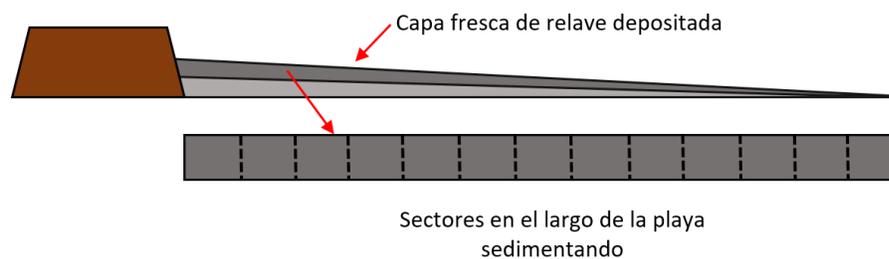


Figura 7.9: Sectores de la playa sedimentando.

2. Cada tramo de la playa se considera como un ensayo individual de sedimentación, con una duración de acuerdo al tiempo total de la depositación dividido por la cantidad de tramos. Este ensayo individual se describe como una columna de suelo de 10 [cm] sedimentando. Por ejemplo, si se consideran 6 horas de depositación, utilizando 24 tramos, el primero sedimenta 6 [h], el segundo 5.75 [h], el tercero 5.5 [h] y así sucesivamente, hasta el primer tramo, el cual sedimenta 0.25 [h]. Lo anterior busca emular el tiempo que el relave depositado alcanza a sedimentar en la descarga.

3. Al sedimentar cada tramo, en la altura se tiene una distribución de C_p según los nodos de CONDES0. Por lo cual se divide esta altura en 3 niveles (i, ii, iii) de acuerdo a la altura de capa de 10 [cm], esta división en 3 niveles de cada tramo genera $24*3 = 72$ sub-tramos. Posteriormente se calcula un valor promedio del C_p ($\overline{C_p}$) para cada nivel.

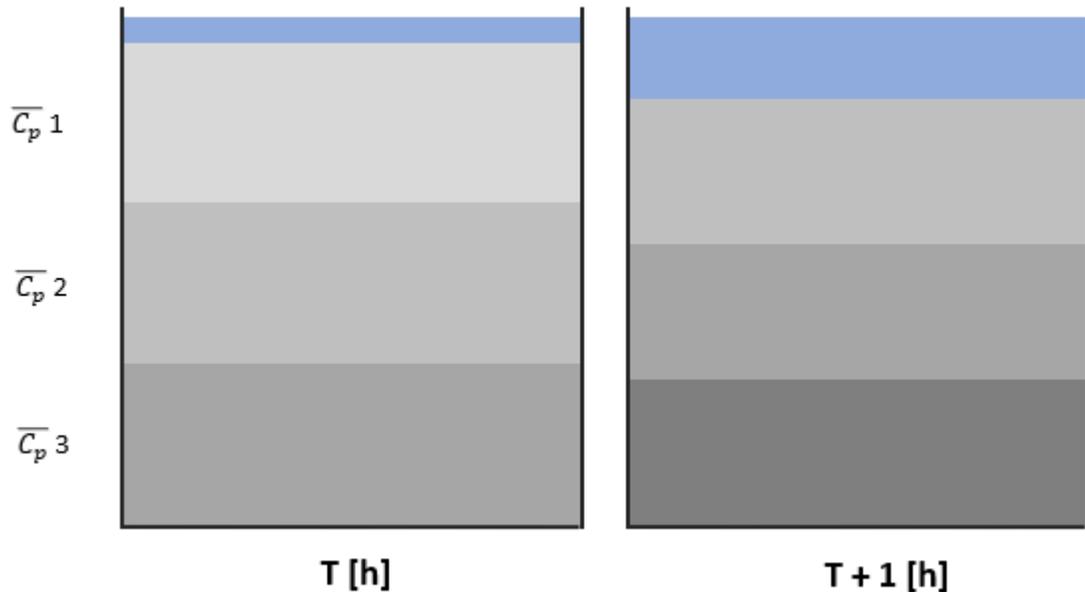


Figura 7.10: Sectores sedimentando y sub-tramos.

4. Con el objetivo de simular la mezcla de flujos con el agua liberada, el relave que sedimenta y el que finalmente queda depositado, estos 72 sub-tramos se ordenan siguiendo los siguientes criterios:
- En la capa superior se encuentran los $\overline{C_p}$ más acuosos, ordenados desde el mayor al menor
 - En la capa intermedia, $\overline{C_p}$ medios, ordenados del mayor al menor
 - En la capa inferior, los $\overline{C_p}$ más altos, ordenados del mayor al menor
5. Finalmente, para poder comparar los resultados del modelo con los datos obtenidos en terreno, se estima un C_p representativo de cada tramo según la distancia, para esto se analizan 4 criterios:
- Promedio de las 3 capas
 - Promedio de la capa superior y media
 - Valor de la capa superior

Para la sedimentación, se calibra CONDES0 con los relaves de Centinela. Para una altura de 10 [cm] de capa, CONDES0 delimita la sedimentación en una cantidad constante de 51 nodos, estos 51 nodos se dividen en 3 niveles (i, ii, iii) con 17 nodos cada uno. En cada uno de estos niveles se calcula el C_p promedio (tabla 7.1).

Tabla 7.1: Sub-sectores de relave sedimentando.

Frasco N°	Tiempo sedimentando [h]	Cp por nivel en altura		
		i	ii	iii
1	0.25	0.650	0.650	0.657
2	0.5	0.634	0.651	0.662
3	0.75	0.620	0.653	0.667
4	1	0.606	0.655	0.670
5	1.25	0.593	0.658	0.674
6	1.5	0.582	0.660	0.678
7	1.75	0.571	0.662	0.680
8	2	0.561	0.665	0.683
9	2.25	0.552	0.667	0.685
10	2.5	0.544	0.669	0.688
11	2.75	0.536	0.671	0.690
12	3	0.529	0.673	0.692
13	3.25	0.523	0.674	0.694
14	3.5	0.517	0.676	0.695
15	3.75	0.512	0.677	0.697
16	4	0.507	0.679	0.698
17	4.25	0.502	0.680	0.700
18	4.5	0.498	0.681	0.701
19	4.75	0.494	0.682	0.702
20	5	0.491	0.683	0.703
21	5.25	0.488	0.684	0.704
22	5.5	0.485	0.685	0.705
23	5.75	0.482	0.686	0.706
24	6	0.480	0.687	0.707

Posteriormente, los sub-tramos por sector se ordenan según los criterios mencionados en el paso 4 en una playa modelada de depositación (tabla 7.2).

Tabla 7.2: Simulación de playa de relaves depositado con C_p por niveles.

x [m]	0	48	96	143	191	239	287	335	383	430	478	526	574	622	670	717	765	813	861	909	957	1004	1052	1100
Capa superior	0.65	0.63	0.62	0.61	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.54	0.54	0.53	0.52	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48
Capa Media	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65
Capa inferior	0.71	0.71	0.71	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.67	0.66	0.66

La tabla 7.2 muestra una playa de relaves en su largo, dividida en 24 sectores y cada uno con diferentes C_p en su altura producto de la mezcla y la sedimentación durante la depositación. La escala de grises en las celdas se utiliza para dar una idea de lo concentrados que están algunos sectores en comparación a otros de acuerdo a la posición que tienen en la playa (largo y altura) y al tiempo que llevan sedimentando.

Como se mencionó en el paso 4, se deben estudiar la forma más óptima de representar el C_p para cada tramo en la distancia, los resultados se muestran en la tabla 7.3.

Tabla 7.3: C_p promedio por sector.

x [m]	0	48	96	143	191	239	287	335	383	430	478	526	574	622	670	717	765	813	861	909	957	1004	1052	1100
Capa superior	0.650	0.634	0.620	0.606	0.593	0.582	0.571	0.561	0.552	0.544	0.536	0.529	0.523	0.517	0.512	0.507	0.502	0.498	0.494	0.491	0.488	0.485	0.482	0.480
Promedio capas	0.650	0.645	0.639	0.634	0.629	0.624	0.620	0.615	0.612	0.608	0.604	0.601	0.598	0.595	0.592	0.589	0.587	0.584	0.582	0.579	0.577	0.575	0.573	0.571
Promedio media y superior	0.650	0.648	0.647	0.645	0.644	0.642	0.641	0.640	0.638	0.637	0.636	0.635	0.634	0.633	0.632	0.631	0.630	0.629	0.628	0.627	0.625	0.624	0.623	0.622

En la figura 7.11 se muestran las curvas propuestas para considerar el C_p por tramo además de los datos de terreno.

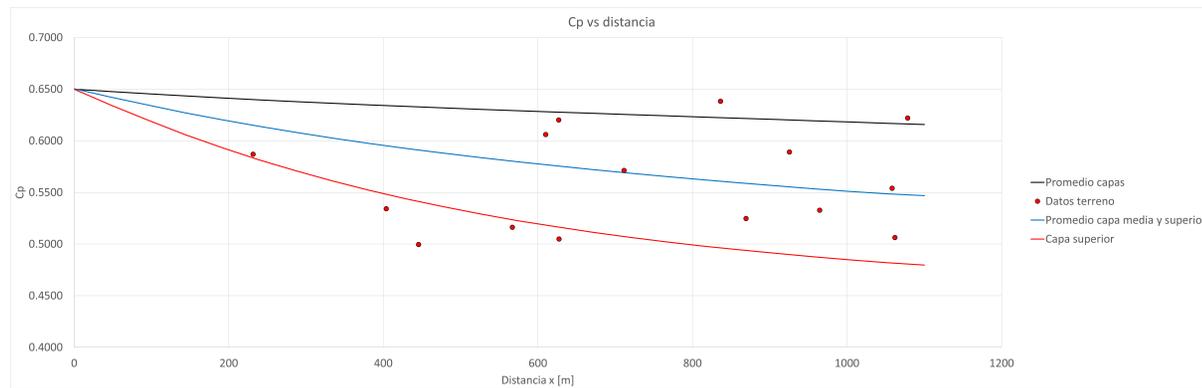


Figura 7.11: Modelos de distribución de C_p y datos de terreno.

Sobre el modelo realizado, se propone como la curva que ajusta la variación del C_p en la distancia la curva ‘Capa superior’. A medida que la capa alcanza su altura final, los relaves que finalmente quedan más superficialmente, corresponden a los de la capa superior y estos son los relaves que forman el perfil de depositación.

Se observa que las curvas ‘Promedio capas’ y ‘Capa superior’ indican un límite superior e inferior, respectivamente, de los datos obtenidos en terreno. Lo anterior se explica con que las muestras tomadas en terreno corresponden a un transiente de lo que finalmente se depositará, esto quiere decir, en terreno se tomaron muestras de la zona más inferior de la capa que queda depositada y el modelo simula la distribución que tiene el C_p según la sedimentación para la capa completa. Si se tuviera una cantidad considerable de muestras estandarizadas, se vería que mientras más cerca se está del spigot de descarga, las muestras serían similares a la curva promedio capas, mientras que más lejos, a la curva capa superior.

7.3. Variación del yield stress y concavidad de playas

En primera instancia, se evalúa el modelo de variación de C_p con los datos de terreno, pero dado que estos datos tienen una alta dispersión, principalmente debido a las condiciones operacionales y al C_p inicial de producción, se comparará el modelo con una siguiente etapa, la cual es calcular el perfil de depositación (altura y pendientes formadas) en el depósito y comparar con los datos de la topografía en terreno.

Para esto, se utilizará la variación de C_p obtenida del modelo holístico, calibrando un modelo de variación de yield stress en la distancia, obteniendo un perfil de depositación según la distancia.

Según la literatura (Errázuriz, 2018), el yield stress (τ_y) se puede relacionar con el C_p según la siguiente ecuación potencial:

$$\tau_y = [A + BC_p]^\alpha \quad (7.1)$$

Donde:

- A, B, α : Parámetros que dependen del tipo de suelo, se deben calibrar según data experimental

Estos parámetros fueron calibrados para el relave de Centinela en la ecuación 2.8.

Como se analizó en la revisión bibliográfica, el yield stress (τ_y) es el principal factor a considerar para la formación de pendientes y su comportamiento en la distancia se puede modelar como un disminución exponencial del mismo desde el punto inicial de la depositación dependiendo de un factor μ a calibrar, esta expresión es:

$$\tau_y(x) = \varphi e^{\mu x} \quad (7.2)$$

Donde:

- φ : Yield stress inicial del relave
- μ : Parámetro que depende del suelo, se debe calibrar según data

- x: Distancia desde el punto de descarga

Con estas dos ecuaciones, primero se debe calcular τ_y en la distancia según la ecuación 7.1 para posteriormente graficar este τ_y calculado con la distancia y ajustar una curva exponencial, obteniendo un valor de μ .

Finalmente, para evaluar el modelo, se debe tener la data en terreno de perfiles topográficos. Estos perfiles topográficos se obtienen mediante topografía aérea con el sobrevuelo de un dron en el depósito de relaves.

Sabiendo que la altura de un perfil de relaves en la depositación, según x, sigue la ecuación 7.3 (Errázuriz, 2018):

$$y(x) = y_{x=0} - \theta_{beach(x=0)} \frac{e^{\mu x} - 1}{\mu} \quad (7.3)$$

Donde:

- y(x): Altura del perfil
- x: Distancia
- $\theta_{beach(x=0)}$: Pendiente de la playa de relaves según la ecuación 2.9
- μ : Valor que ajusta la variación de τ_y en la distancia

Con esta metodología y los datos de Centinela, se ajusta un valor de μ que se adecue a los parámetros del relave (figura 7.12):

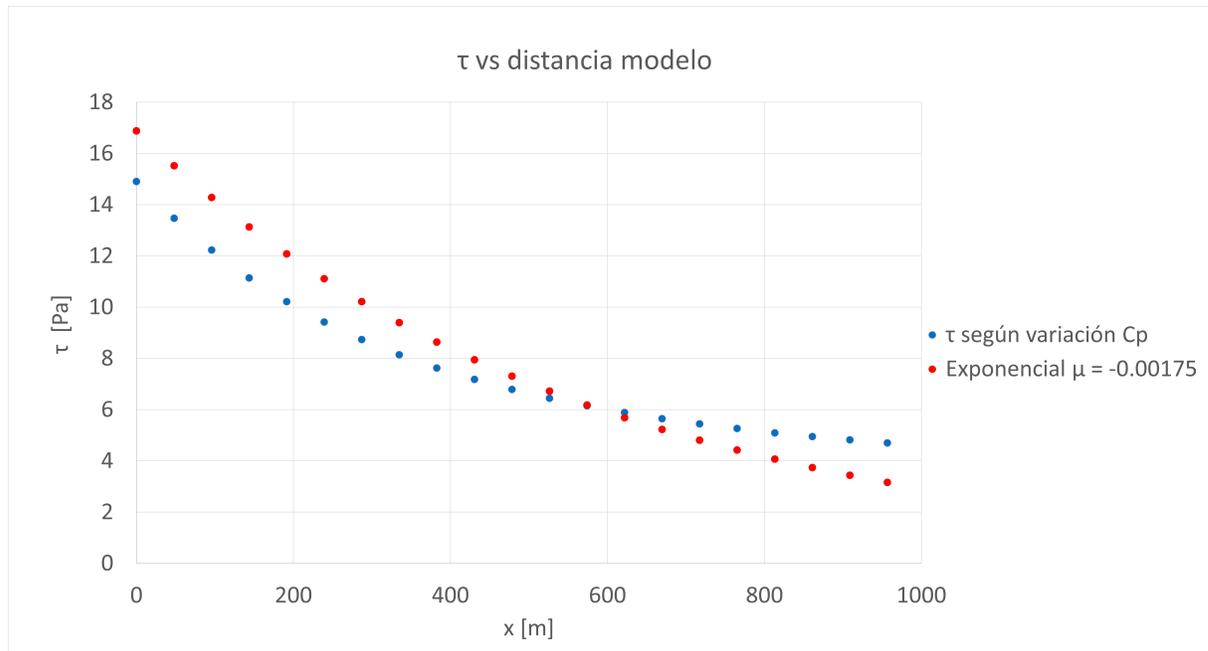


Figura 7.12: τ_y según distancia del modelo y variación de C_p .

Con este valor de μ calibrado, se puede obtener un perfil en la distancia y comparar con los obtenidos desde Centinela con topografía aérea:

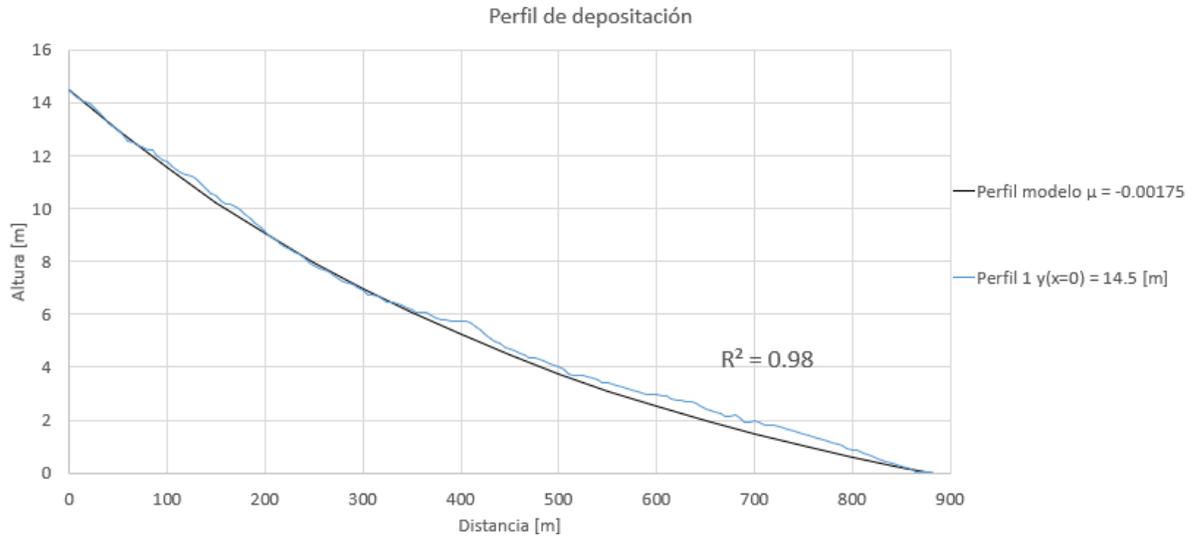


Figura 7.13: Perfil 1 de Centinela y modelo calibrado.

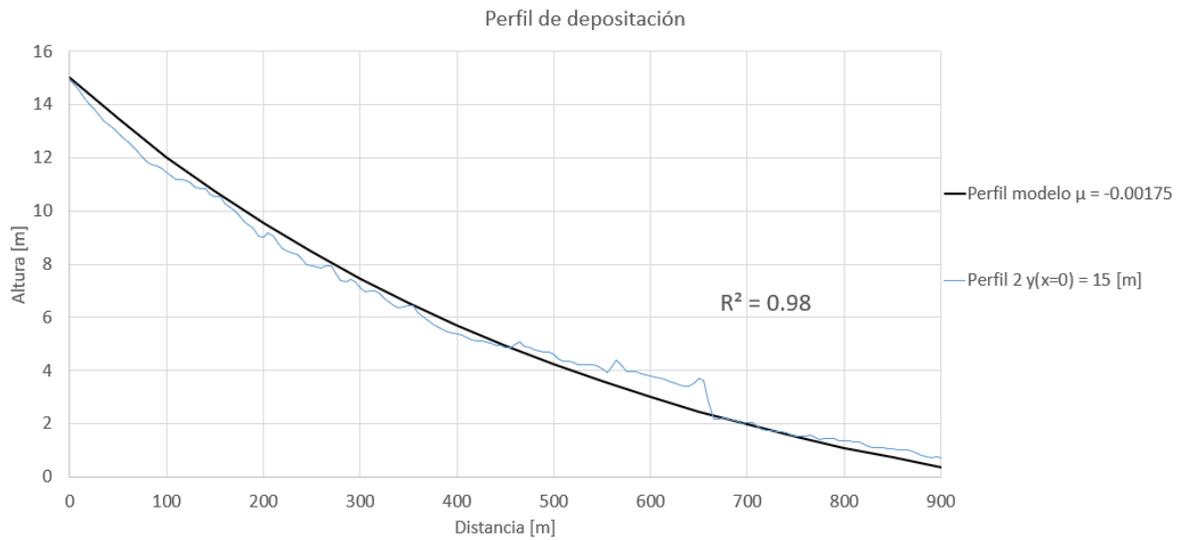


Figura 7.14: Perfil 2 de Centinela y modelo calibrado.

7.3.1. C_p inicial y concavidad de playas

En esta sección se analizará el escenario de depositar con un C_p mayor que el analizado anteriormente (65%) y cómo este valor impacta a la pendiente del perfil de la playa y las concavidades.

Se analizará un C_p de descarga del 67% en una playa de 1.1[km], espesor 6 [m] y ancho 300 [m].

Siguiendo la misma metodología que en la sección anterior, se calcula la variación de C_p en la distancia con respecto al punto de descarga considerando los valores de la capa superior de relaves, estos resultados se muestran en la figura 7.15.

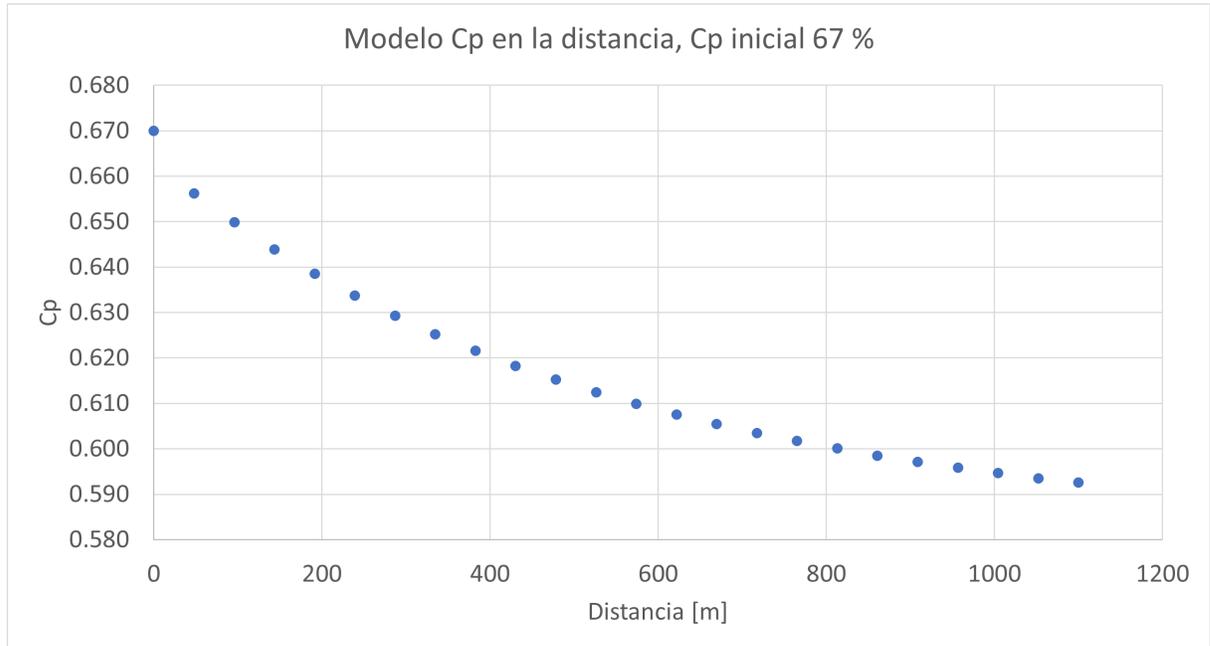


Figura 7.15: C_p en la distancia desde la descarga para C_p inicial 67%.

Posteriormente, relacionando la variación del C_p con la variación de τ_y , se obtiene la variación de τ_y con respecto a la distancia de la descarga (figura 7.16).

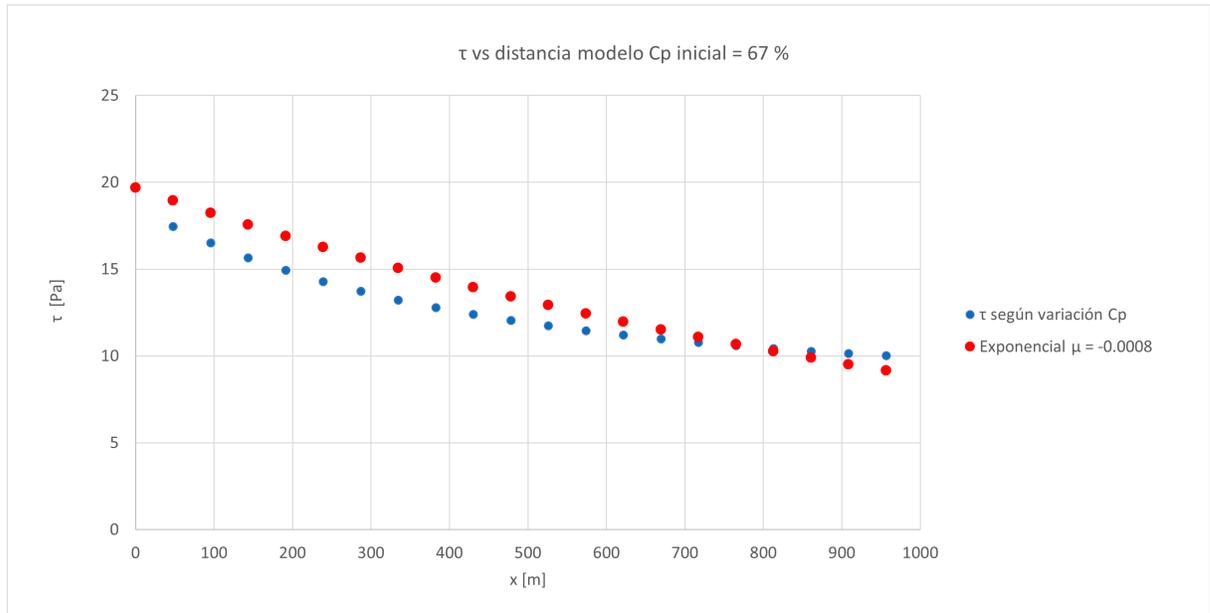


Figura 7.16: τ_y en la distancia para C_p inicial 67%.

Con esta variación de τ_y se calibra el modelo de la sección anterior, obteniendo un perfil de depositación con un C_p de descarga de 67%.

La concavidad de la depositación se puede entender como la variación de la pendiente puntual en la distancia. La forma de calcular la pendiente puntual se muestra en la ecuación 7.4.

$$m_{i-j}[\%] = \frac{h_j - h_i}{x_j - x_i} * 100 \quad (7.4)$$

- $m_{i-j}[\%]$: Pendiente puntual entre los puntos i y j.
- $h_{i,j}$: Altura de los puntos i y j, respectivamente.
- $x_{i,j}$: Distancia al punto de descarga de los puntos i y j, respectivamente.

Esta definición de pendiente puntual y su variación permiten estimar las concavidades presentes en un perfil de depositación. Los valores de la pendiente puntual en la distancia se calculan para los perfiles obtenidos considerando C_p iniciales de 65 % y 67 %, estos valores se muestran en la figura 7.17

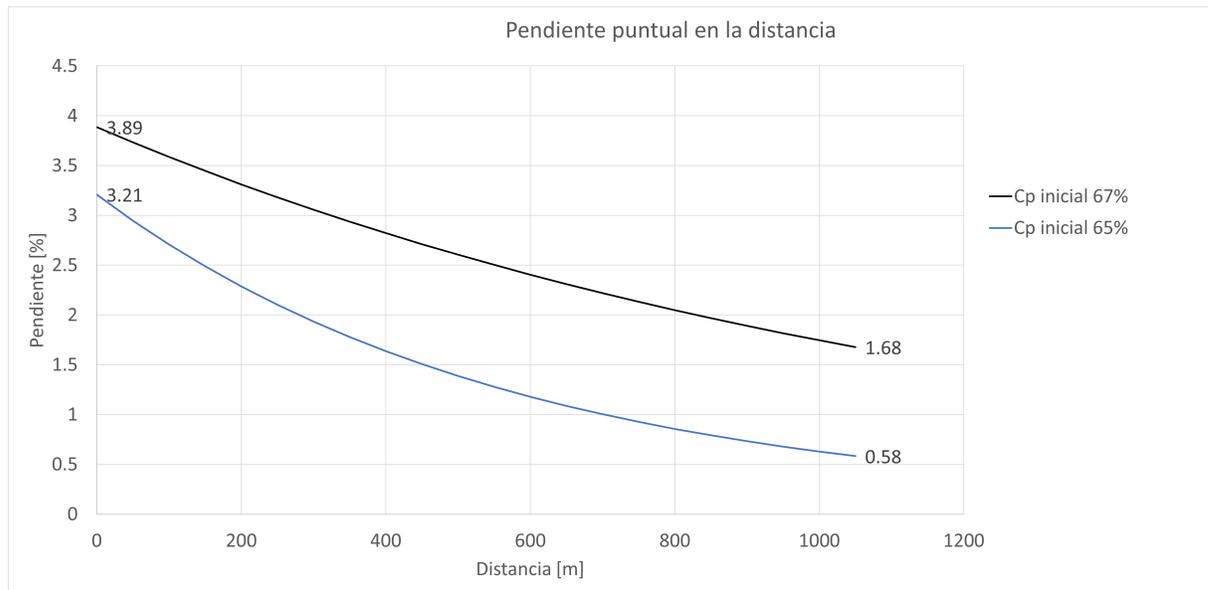


Figura 7.17: Concavidad, variación de la pendiente en la distancia.

Calculando la diferencia de pendiente local desde el inicio del perfil hasta el final (ecuación 7.5).

$$\Delta m = m_0 - m_{fin} \quad (7.5)$$

Donde:

- $\Delta m [\%]$: Diferencia de pendientes entre el inicio del perfil y el final
- $m_0 [\%]$: Pendiente local al inicio del perfil
- $m_{fin} [\%]$: Pendiente local al final del perfil

Calculando las respectivas diferencias de pendientes para las descargas de C_p 65 % y 67 % (ecuación 7.6).

$$\Delta m_{C_p=67\%} = 3.89 - 1.68 = 2.21 \% \quad (7.6)$$

$$\Delta m_{C_p=65\%} = 3.32 - 0.58 = 2.63\% \quad (7.7)$$

Porcentualmente esta variación se calcula como (ecuación 7.8):

$$\Delta m \% = \frac{\Delta m}{m_0} * 100 \quad (7.8)$$

Donde:

- $\Delta m \%$ [%]: Variación porcentual de la pendiente
- Δm : Variación de la pendiente entre el inicio al fin del perfil
- m_0 : Pendiente inicial del perfil

Así, para cada C_p inicial la variación porcentual de la pendiente es (ecuación 7.9):

$$\Delta m \%_{67\%} = \frac{2.21}{3.89} = 56.8\% \quad (7.9)$$

$$\Delta m \%_{65\%} = \frac{2.63}{3.32} = 79.21\% \quad (7.10)$$

Se observa que el impacto de la concavidad es mayor para la descarga con C_p inicial de 65% que para la de 67%, en particular, la variación de la pendiente para un C_p en la descarga de 65% es 0.42 puntos porcentuales mayor que para un C_p en la descarga de 67%. Esta diferencia se observa en la variación porcentual de la pendiente, donde para un C_p en la descarga de 65% se tiene una variación del 80% y para 67% del 57%, aproximadamente. Así, se evidencia que el tener un C_p más concentrado en descarga implica menores concavidades en el perfil de la playa.

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se analizarán las conclusiones del trabajo realizado. En primera instancia se realizará un punteo de las principales trabajos realizados.

Sobre la variación del C_p del relave recién depositado con respecto a la distancia de la descarga y la concavidad de playas:

- Mediante un dispositivo ideado y calibrado para esta memoria que buscaba tomar muestras representativas de la pulpa que se deposita sobre una capa previa de relaves, se mide que el C_p recién depositado varía con la distancia de la descarga, alcanzando variaciones de hasta 15 puntos porcentuales a los 1100 [m].
- Se plantea una explicación conceptual del fenómeno observado de la variación del C_p con respecto a la distancia de la descarga.
- Se propone un modelo en base a las propiedades de sedimentación y consolidación del relave durante la depositación que propone una solución holística para representar la explicación conceptual de la variación del C_p en la distancia.
- Relacionando la variación del C_p con una variación del τ_y y utilizando un modelo de estimación de pendientes, se logra reproducir las concavidades de los perfiles de playas de relaves, verificando que la variación del C_p puede explicar la concavidad de las playas.

Sobre el proceso de consolidación y secado de la capa de relave recién depositada en un esquema de depositación de capas delgadas y con ciclos de secado:

- Se establece una metodología estandarizada de muestreo enfocada en medir la evolución de la densidad de la capa recién depositada. Se observa que a las 24 [h] el relave alcanza una humedad gravimétrica del 28 %, valor que se mantiene constante para los tiempos mayores medidos (hasta las 72 [h]).
- Se propone un modelo simplificado que explica la evolución de la humedad medida en terreno para las primeras 24 [h] después de la depositación.
- Utilizando el modelo, con una concentración $C_p = 65 \%$, teniendo una capa de 6 [cm] se llega a una humedad del 28 % en 24 [h]. Para capas más gruesas, se demora más tiempo, 42 y 51 [h] para capas de 10 y 15 [cm], respectivamente. Para tiempos mayores, se espera que el relave comience un proceso de desaturación. Dado lo anterior, se recomienda aplicar ciclos de secados de 24 [h] al relave depositado.

A continuación se detallarán las conclusiones de los trabajos anteriormente señalados.

Sobre el muestreo realizado

Sobre la metodología para relave fresco, esta busca obtener una muestra representativa del relave que finalmente queda depositado durante la formación de playas de relave en el contexto de una depositación con capas delgadas y ciclos de secado. El muestreo en terreno indica que el relave que se deposita más lejos está menos concentrado (menor C_p), midiendo variaciones de hasta 15 puntos porcentuales con respecto al C_p de descarga para distancias de 1100 [m].

En cuanto al muestreo de relave en proceso de consolidación y secado, se observa que a las 24 [h] de ser depositado el relave alcanza la humedad de la capa previa (28 %), valor el cual se mantiene constante para tiempos mayores. Se propuso un modelo simplificado del secado y la consolidación de la capa, la principal simplificación es considerar que la capa está completamente a un C_p conocido y además, no considerar el efecto del drenaje completamente (grietas y otras condiciones en el depósito), aún así, se obtuvieron resultados consecuentes con los medidos en terreno sobre la evolución de la humedad, observando que para las primeras horas, la mayor variación de la humedad se debe a la sedimentación y posteriormente a la evaporación. Además, se muestreó satisfactoriamente la capa objetivo, obteniendo la variación de la humedad en el tiempo para la capa.

Sobre la variación de C_p , pendientes y concavidades

Una de las principales conclusiones del trabajo realizado es que la variación del C_p en la distancia se debe al efecto de la sedimentación del relave y su consolidación por el peso propio sumado al transporte de sólidos durante la depositación. La sedimentación durante las primeras horas de la depositación es de relevancia pues la velocidad vertical a la cual sedimenta el relave es un orden de magnitud mayor que la evaporación. El agua que se libera por la sedimentación no se evapora inmediatamente, sino que escurre aguas abajo en forma de mezcla con los relaves que se depositan más lejos, generando C_p más acuosos a medida que más lejos se está del spigot de descarga.

El modelo holístico propuesto para explicar la variación del C_p en la distancia indica que existen diferentes formas de considerar el C_p representativo en la distancia (promedio de las 3 capas, promedio de la capa media y superior y valor de la capa superior), estas curvas pueden indicar límites para las variaciones de C_p a esperar en una depositación y la curva a escoger se puede calibrar tomando muestras en terreno, como se realizó en esta memoria. Aún así, se concluye que la forma más intuitiva de considerar la curva representativa de la variación del C_p en la distancia es considerar los valores del C_p de la capa superficial, principalmente porque estos son los que forman el perfil de depositación (zona más superficial).

Si bien es correcto considerar que un relave con $C_p = 65\%$ tenga cierta pendiente (3-4 %), esta condición del C_p no se mantiene constante en la distancia y como se estudió, pequeñas variaciones del C_p generan grandes variaciones en el yield stress τ_y y este parámetro es el que mayor impacto tiene para el cálculo de la pendiente de un relave. Finalmente, la variación en la distancia del C_p se relaciona con la variación de τ_y y con esto se explica la concavidad de las pendientes. Se propone un modelo para estimar la variación del C_p en la distancia y

mediante un modelo predictivo de pendientes, se evalúa la concavidad de las playas de relave. Además, se verifica que mayores C_p de descarga generan mayores pendientes de depositación como también menores concavidades en la formación del perfil de la playa.

Sobre la densidad del relave

Con respecto a la evolución de la densidad, se observa que esta aumenta en el tiempo, debido a la consolidación del relave y al secado. Estos resultados son de relevancia pues provienen de una metodología que registra las condiciones de la capa depositada (altura y humedad). La metodología mejorada no se logró poner a prueba en terreno por razones de tiempo, pero con ella se podría obtener la saturación día a día de los relaves depositados, lo cual es fundamental para estimar, en un promedio y por sector, el potencial de licuación de los relaves depositados superficialmente.

8.1. Recomendaciones para la operación

- El modelo de concavidad sugiere que para minimizar la concavidad, el tiempo de descarga debe ser el necesario para llegar a cubrir la distancia de la playa una sola vez. Si se descarga más tiempo, se arrastra una mayor cantidad de relaves más acuosos aguas abajo. Esto quiere decir que, si se desea cubrir un largo L de playa, la descarga debe cesar cuando los relaves depositados toquen la distancia L .
- El modelo sugiere que a mayor C_p inicial, se deberían tener menores concavidades, por lo tanto, al incrementar el C_p de producción no solo mejora la pendiente, sino que reduce la concavidad y representa una mayor eficiencia para lograr mayores pendientes de playa promedio en el largo total. Este punto se verifica mediante el modelo considerando un C_p en la descarga de 67 %.
- Sobre el secado, para una capa de 6 [cm], la humedad se estabiliza a la de la capa previa en 24 [h] (28%), este punto en la curva de secado implica una densidad seca de 1.6 [$\frac{t}{m^3}$], que pareciera ser suficiente para tener relaves ligeramente dilatantes, en base a los ensayos triaxiales. Cabe mencionar que el secado de una capa puede ser mayor al ciclo de la cancha debido a que las playas activas tienden a tener una posición cambiante dentro de la cancha, esto es una característica que favorece un mayor secado respecto a lo que indica el modelo simplificado (cuando una playa activa se deposita en un sector la playa activa del próximo ciclo no necesariamente se depositará completamente encima). Si se quiere desaturar, se requieren de mayores tiempos. El tener capas más gruesas, aumenta el tiempo para llegar al 28 % de humedad progresivamente según el espesor de capa depositado.
- Cabe mencionar que las mediciones en terreno desarrolladas en esta memoria indican que la evolución de la humedad del relave recién depositado se estabiliza a las 24 [h] en un 28 % y se mantiene en dicho valor por el periodo total de las mediciones (72 [h]). Este valor se condice con una densidad seca de 1.6 y una saturación cercana al 100 %, es interesante notar que este valor está lejos del valor del límite de contracción que se maneja para Centinela (en torno al 16 %). Se sugiere revisar este valor del límite de contracción y la metodología con la cual se obtiene dado que las curvas de contracción

de Golder permiten inferir que el límite de contracción se encuentra entre 22-25 %. De igual modo, se sugiere revisar la metodología para determinar los límites de Atterberg (uso de agua salada y preparación de la muestra), dado que el límite líquido típico se encuentra en torno al 23 %, lo cual no es consistente con la medición de terreno que a las 24 [h] se tiene una humedad del 28 % en una muestra de relave con aspecto más bien sólido y de densidad seca $1.6 \left[\frac{t}{m^3} \right]$.

8.2. Recomendaciones para futuros estudios

A continuación se señalarán, en base al trabajo realizado, posibles temas de investigación sobre relaves espesados:

- Evaluar mejoras al prototipo de muestreador (anexo F) y llevarlo a un diseño industrial de tal modo de poder sistematizar un mayor número de mediciones en la formación de playas, considerando múltiples trampas de relave en el largo.
- Continuar con las mejoras propuestas para medir la evolución de la densidad y humedad (saturación) de la capa de relave depositado (anexo G) con el fin de relacionar la densidad alcanzada con el comportamiento geomecánico objetivo.
- Verificar la variación vertical de la granulometría en una capa de depositación para estudiar el efecto de la sedimentación en la granulometría de la capa.
- Realizar ensayos de τ_y a muestras estandarizadas de relave para diferentes C_p y estudiar el impacto del % de finos sobre el τ_y .
- Progresar en la formulación del modelo holístico de esta memoria hacia un modelo físico basado en el transporte de sólidos durante la depositación de relaves incluyendo la sedimentación y su impacto aguas abajo.
- Analizar posibles aplicaciones de toma de muestras en depósitos de relaves con métodos remotos, como por ejemplo, utilizando drones.
- Evaluar los métodos de ensayo para obtener el límite de contracción (metodología ASTM versus metodología curva de encogimiento) y evaluar una discusión sobre su relación con los límites de Atterberg tradicionales y específicamente, estudiar el impacto de la presencia de sales y la preparación de la muestra en dichos límites.

Capítulo 9

Bibliografía

Bazán, I. (2020). Design Review for a Distributed Tailings Deposition System. *Paste* 2020.

Torfs, E. et al. (2016). *Experimental Methods In Wastewater Treatment*. Edited by M.C.M. van Loosdrecht, P.H. Nielsen, C.M. Lopez-Vazquez and D. Brdjanovic. ISBN:9781780404745(Hardback), ISBN: 9781780404752 (eBook). Published by IWA Publishing, London, UK.

Errázuriz, T. (2018). Tailings beach slopes as a dimensionless parameter of non-Newtonian flows. *Paste* 2018.

Fisseha, B. & Bryan, R. & Simms, P. (2010). Evaporation, Unsaturated Flow, and Salt Accumulation in Multilayer Deposits of "Paste"Gold Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*. 136. 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000367.

Fitton, T. & Bhattacharya, S. & Chryss, A. (2008). Three-Dimensional Modeling of Tailings Beach Shape. *Comp.-Aided Civil and Infrastruct. Engineering*. 23. 31-44. 10.1111/j.1467-8667.2007.00519.x.

Fourie, A. (2003). Achieving a stable landform with mine tailings: opportunities offered by the Thickened Tailings technique. In I. Vanicek, R. Barvinek, J. Bohac, J. Jettmar, D. Jirasko, & J. Salak (Eds.), *Geotechnical Problems with Man made and Man Influenced Grounds Prague, Czech Republic ed., Vol. 1, pp. 77 82*). Praha, Czech Republic: The Czech Geotechnical Society.

Fredlund, D. & Zhang, F. (2018). Effect of Initial Conditions on the Interpretation of Soil-Water Characteristic Curves (SWCCs) in Geotechnical Engineering. 1-31. 10.1061/9780784481677.001.

Henríquez, J. & Simms, P. (2009). Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings. *Minerals Engineering*. 22. 128-139. 10.1016/j.mineng.2008.05.010.

ICOLD and UNEP (ICOLD). (2001). *Bulletin 121: Tailings dams - risk of dangerous occurrences, Lessons learnt from practical experiences*, Paris, 144.

Ihle, C. & Tamburrino, A. (2009), 'Proposed Scaling Laws for Laminar Flow of a Bingham Plastic Down an Inclined Plane', in R Jewell, AB Fourie, S Barrera & J Wiertz (eds), Proceedings of the Twelfth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 225-232, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/963_26.

Jefferies and Been. (2016). Soil Liquefaction, A Critical State Approach, Second Edition. Taylor and Francis Group.

Li, A. (2011), 'Prediction of tailings beach slopes and tailings flow profiles', in R Jewell & AB Fourie (eds), Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 307-322, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1104_28_ALi.

McPhail, G. (1995) Prediction of the beaching characteristics of hydraulically placed tailings, PhD Dissertation submitted to the University of the Witwatersrand, Johannesburg.

Simms, P. & Grabinsky, M. & Zhan, G. (2007). Modelling evaporation of paste tailings from the Bulyanhulu mine. Canadian Geotechnical Journal. 44. 1417-1432. 10.1139/T07-067.

Simms, P. & Dunmola, A. & Fisseha, B. & R, B. (2010). Generic modelling of desiccation for cyclic deposition of thickened tailings to maximize density and to minimize oxidation. Proceedings of the 13th International Conference on Paste and Thickened Tailings, Toronto, Ontario, May 3-6. 10.36487/ACG_rep/1063_25_Simms.

Shuttleworth, J.A., Thomson, B.J. and Wates, J.A. (2005) Surface disposal at Bulyanhulu - practical lessons learned, in Proceedings Eighth International Seminar on Paste and Thickened Tailings, R.J. Jewell, S. Barrera (eds), Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, pp. 207-218.

Yao, D. & Oliveira filho, W. & Cai, X. & Znidarcic, D. (2002). Numerical solution for consolidation and desiccation of soft soils. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 26. 139 - 161. 10.1002/nag.196.

Anexo A

Datos de muestras C_p en la distancia

Tabla A.1: Datos de C_p tomado a muestras en terreno en distancia y C_p en planta.

Dia	Hora	Cp	Cp	Coordenadas Spigot		Muestra	Coordenadas muestra		Dh [m]
		en planta [%]	medido [%]	Norte	Este	# MM20 -F-	Norte	Este	
31-10-2020	11:10	65.98	55.40	7456932	489031	001	7457984	488915	1058
02-11-2020	9:50	65.71	63.81	7455816	487942	002	7456631	488130	836
04-11-2020	10:32	66.41	60.60	7455910	488019	003	7455572	487511	610
25-11-2020	11:30	66.22	57.12	7456667	488725	004	7457355	488907	712
27-11-2020	11:45	66.63	62.01	7456667	488725	005	7457284	488837	627
27-11-2020	18:00	66.63	53.41	7456220	488267	006	7456464	487945	404
09-12-2020	11:10	66.96	50.47	7456667	488725	008	7457284	488839	627
23-12-2020	11:17	66.67	51.61	7456667	488725	009	7457190	488944	567
24-12-2020	11:20	66.47	58.69	7456600	488671	010	7456731	488480	232
05-01-2021	13:10	66.23	49.95	7456998	489078	014	7457418	488929	446
21-01-2021	9:40	66.07	53.27	7455996	488098	016	7456356	487203	965
22-01-2021	9:44	66.67	62.19	7455816	487942	017	7455986	486877	1078
23-01-2021	9:10	66.69	50.62	7455816	487942	018	7455988	486894	1062
24-01-2021	9:30	65.98	52.47	7455972	488067	019	7456358	487288	869
25-01-2021	9:50	66.79	58.90	7455816	487942	020	7456059	487049	925

Anexo B

Datos de muestras granulometrías en la distancia

Tabla B.1: Datos granulometrías muestras en terreno.

Dia	# Muestra	Granulometría muestra					
		N° 20 ASTM 0.841 mm 841 μ	N° 40 ASTM 0.425 mm 425 μ	N° 50 ASTM 0.297 mm 297 μ	N° 70 ASTM 0.210 mm 210 μ	N° 100 ASTM 0.15 mm 150 μ	N° 200 ASTM 0.075 mm 75 μ
31-10-2020	MM20-F-001	100.0	96	90	82	67	61
02-11-2020	MM20-F-002	100.0	97	92	85	72	70
04-11-2020	MM20-F-003	100.0	97	92	84	71	70
25-11-2020	MM20-F-004	100.0	99	97	91	76	72
27-11-2020	MM20-F-005	100.0	95	87	79	63	56
27-11-2020	MM20-F-006	100.0	98	93	85	70	61
09-12-2020	MM20-F-008	100.0	97	93	84	69	63
23-12-2020	MM20-F-009	100.0	100	99	97	87	80
24-12-2020	MM20-F-010	100.0	98	93	85	74	68
05-01-2021	MM20-F-014	100.0	95	89	80	64	59
21-01-2021	MM20-F-016	100.0	100	99	96	84	75
22-01-2021	MM20-F-017	100.0	94	86	76	60	58
23-01-2021	MM20-F-018	100.0	94	85	75	60	57
24-01-2021	MM20-F-019	100.0	99	97	91	76	72
25-01-2021	MM20-F-020	100.0	98	95	88	75	74

Tabla B.2: Datos granulometrías en planta.

Dia	# Muestra	Granulometría en planta					
		N° 20 ASTM 0.841 mm 841 μ	N° 40 ASTM 0.425 mm 425 μ	N° 50 ASTM 0.297 mm 297 μ	N° 70 ASTM 0.210 mm 210 μ	N° 100 ASTM 0.15 mm 150 μ	N° 200 ASTM 0.075 mm 75 μ
31-10-2020	MM20-F-001	100.0	94	87	77	68	54
02-11-2020	MM20-S-002	100.0	94	89	80	72	60
04-11-2020	MM20-F-003	100.0	96	91	82	74	61
25-11-2020	MM20-F-004	100.0	94	88	80	65	57
27-11-2020	MM20-F-005	100.0	94	88	78	68	57
27-11-2020	MM20-F-006	100.0	95	89	78	66	53
09-12-2020	MM20-F-008	100.0	96	90	81	72	57
23-12-2020	MM20-F-009	100.0	95	88	80	73	60
24-12-2020	MM20-F-010	100.0	93	86	77	68	57
05-01-2021	MM20-F-014	100.0	97	89	81	73	63
21-01-2021	MM20-F-016	100.0	96	90	81	73	59
22-01-2021	MM20-F-017	100.0	95	88	79	68	53
23-01-2021	MM20-F-018	100.0	94	88	78	68	53
24-01-2021	MM20-F-019	100.0	97	91	82	74	59
25-01-2021	MM20-F-020	100.0	97	90	81	73	58

Anexo C

Ensayos de sedimentación

A continuación, se muestran los resultados obtenidos experimentalmente para los ensayos de sedimentación a diferentes concentraciones de sólido y altura de capa:

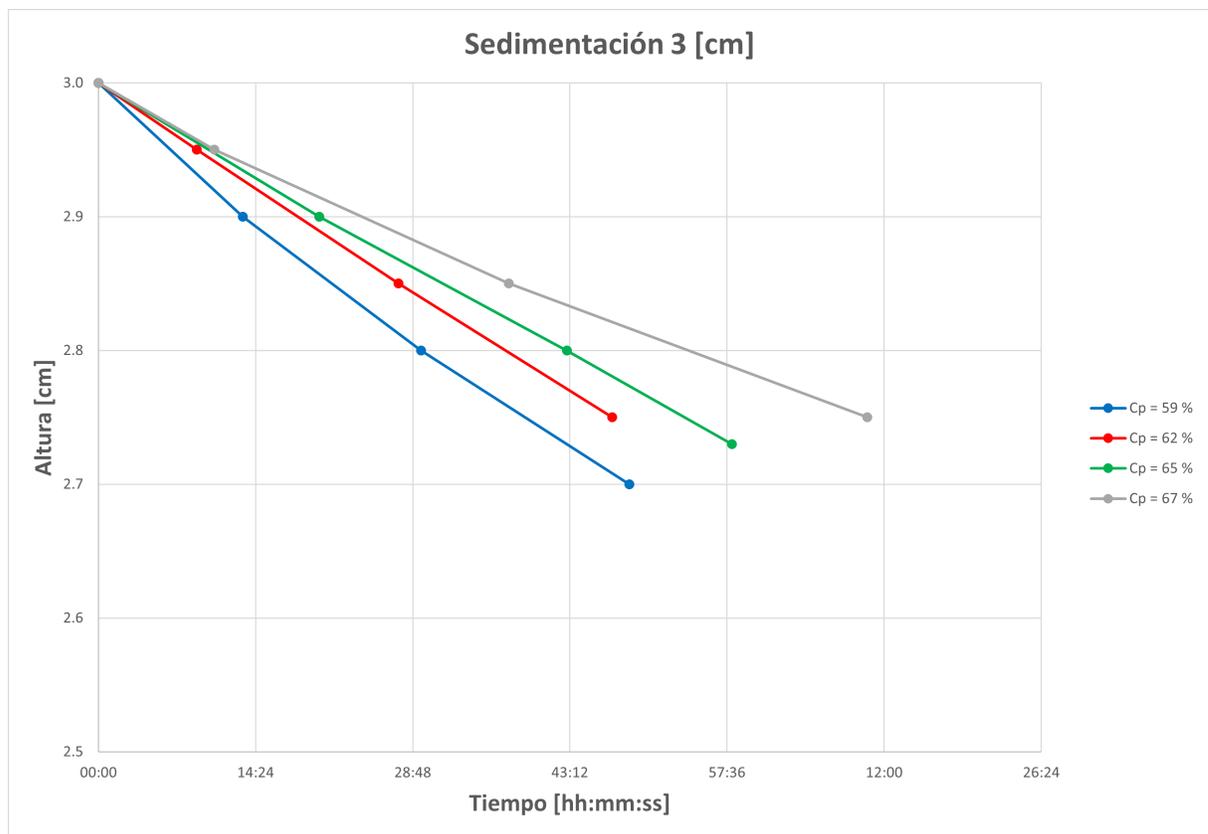


Figura C.1: Ensayo de sedimentación de 3 [cm] para diferentes concentraciones de sólido.

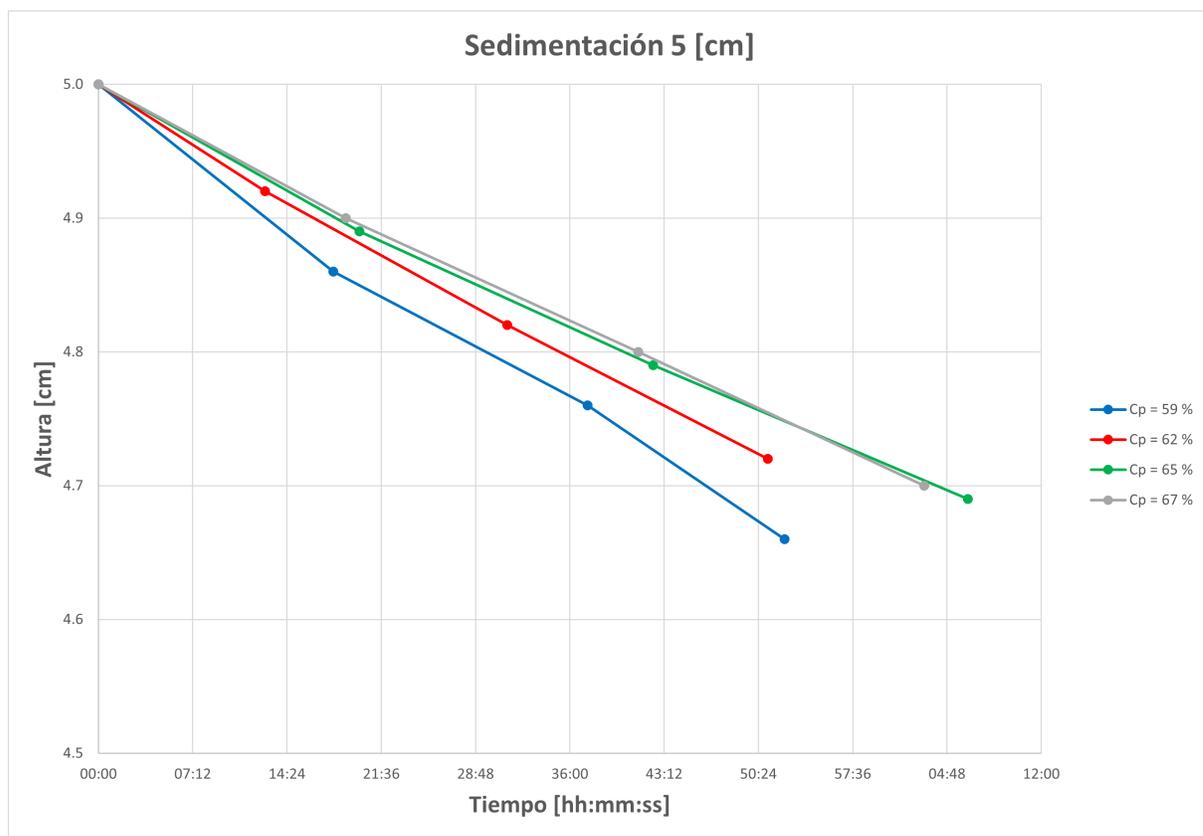


Figura C.2: Ensayo de sedimentación de 5 [cm] para diferentes concentraciones de sólido.

Anexo D

CONDES0

A continuación, se presentan los gráficos que representan la calibración del software CONDES0 con los datos experimentales obtenidos con ensayos de sedimentación:

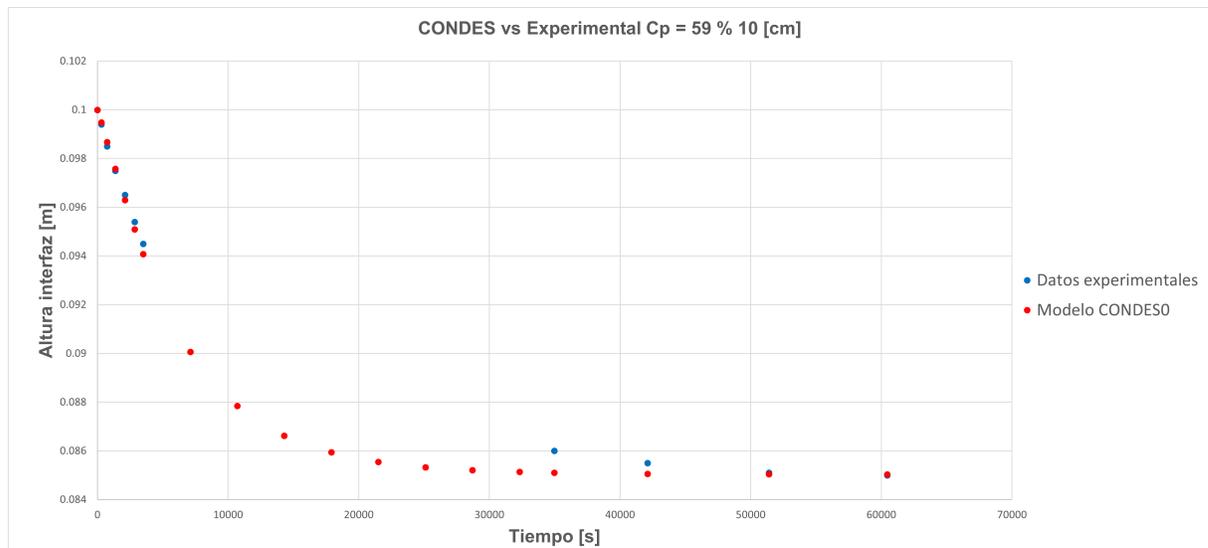


Figura D.1: Experimental vs CONDES0 $C_p = 59\%$.

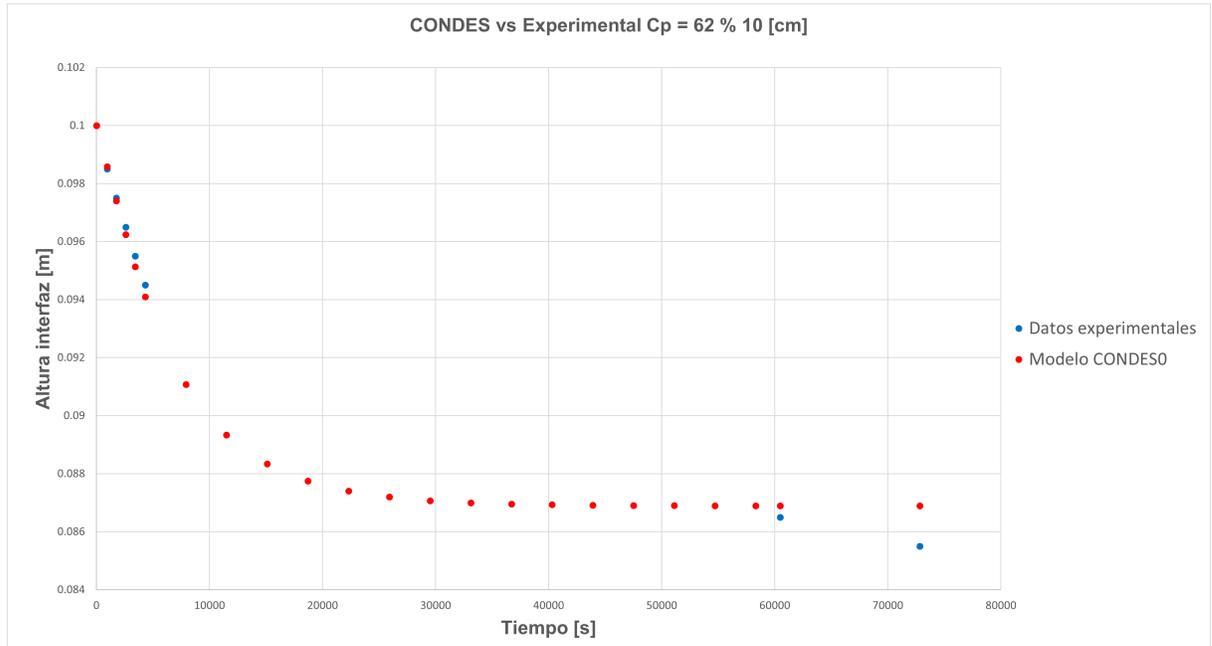


Figura D.2: Experimental vs CONDES0 $C_p = 62\%$.

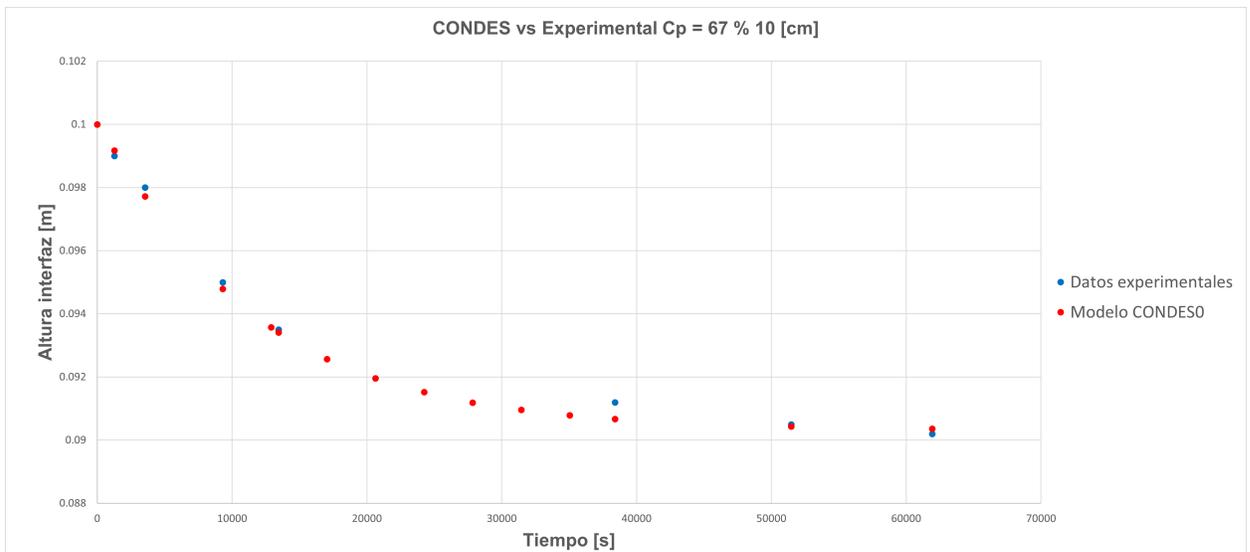


Figura D.3: Experimental vs CONDES0 $C_p = 67\%$.

Anexo E

Perfiles de Centinela



Figura E.1: Perfil 1 de Centinela.

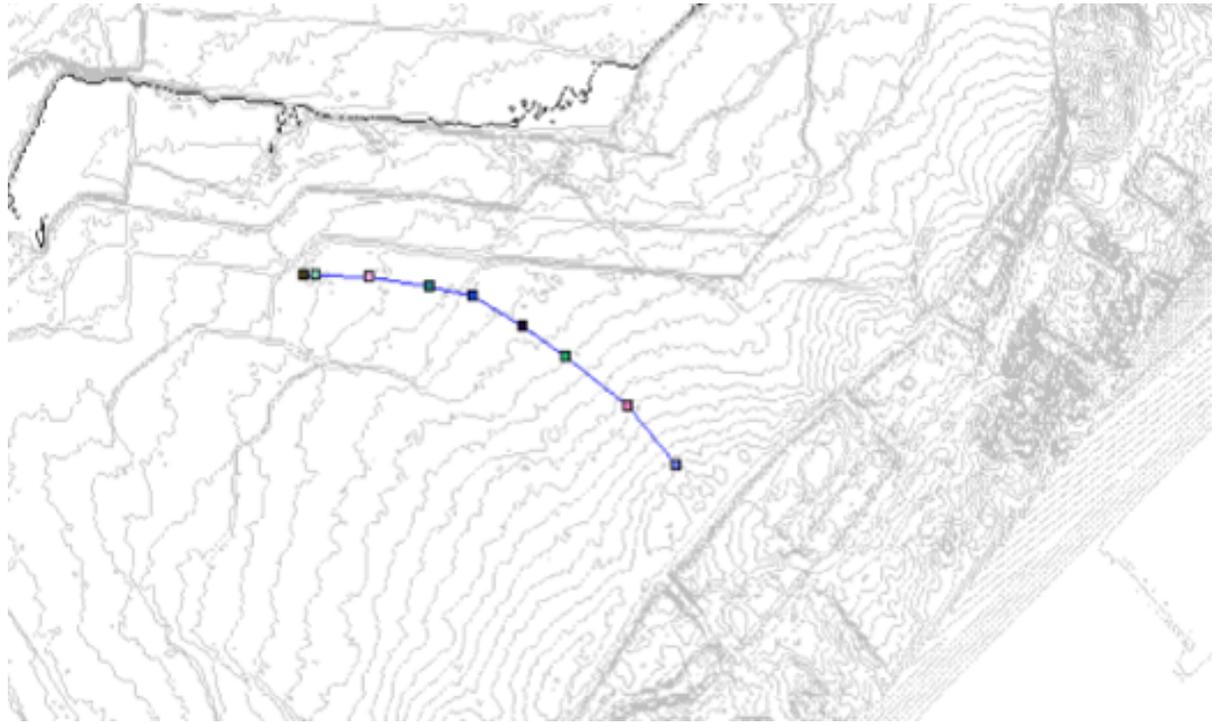


Figura E.2: Perfil 2 de Centinela.

Anexo F

Metodología para relaves frescos

En esta etapa se busca conocer la granulometría y el C_p con el cual se deposita el relave en la evolución del escurrimiento (a diferentes distancias del spigot del cual se descarga), por lo cual el muestreo debe ser capaz de medir con precisión el peso de la muestra obtenida. El procedimiento corresponde a:

- Ubicarse en un pretil a una distancia determinada de la descarga e instalar el dispositivo en una playa inactiva de tal forma de que prontamente y por primera vez le llegue relave fresco.
- Marcar punto con GPS, indicar C_p desde planta, hora y fecha del momento del muestreo, señalar número de muestra según nomenclatura.
- Una vez que el relave recién depositado queda con velocidad 0 sobre el muestreador, se debe proceder a retirar la muestra.



Figura F.1: Ejemplo de momento para muestrear.

- Cabe mencionar que este muestreador está diseñado especialmente para obtener una muestra que no esté perturbada por los relaves del frente de avance de la depositación, el cual es más acuoso. Esto es lo que se evita muestrear pues no es representativo.
- Una vez se levanta el muestreador con la muestra en su interior, se retira el disco y se trasvasija en un recipiente el cual se pueda utilizar en un horno (se recomienda que el recipiente sea metálico).

- Se deben verter progresivamente los 500 [gr] dentro del muestreador para retirar la mayor cantidad de sólidos posible que quedan adheridos al plástico. Posteriormente, se masa el conjunto recipiente, pulpa y 500 [gr] de agua, la medida será:

$$W_{\text{Registrado}} = W_{\text{pulpa}} + W_{\text{agua}=500[\text{gr}]} + W_{\text{Recipiente}} \quad (\text{F.1})$$



Figura F.2: Ejemplo de registro de masa.

- Es importante conocer previamente el peso del recipiente y los 500 [gr] de agua, para registrar correctamente el peso de la pulpa muestreado.
- Finalmente, en laboratorio la muestra se debe secar en su totalidad. Una vez secada la muestra en el horno, se debe masar. La medida obtenida corresponde a $W_{\text{sólidos}}$ (restando el respectivo peso de la vasija en la cual se secó).



Figura F.3: Ejemplo de relave seco.

- Con lo anterior, se puede obtener el C_p depositado como:

$$C_p[\%] = \frac{W_{sólidos}}{W_{pulpa}} * 100 \quad (F.2)$$

Anexo G

Metodología para relave en proceso de consolidación y secado

En esta etapa se busca conocer la evolución del secado del relave, por lo cual día a día se debe monitorear la evolución de la humedad que contiene la capa depositada, teniendo como antecedente la humedad de la capa previa y el C_p del relave depositado.

El procedimiento para el muestro corresponde a:

- En el día 1 durante la descarga, se escoge un lugar en el depósito. Registrar con GPS. En tal lugar realizar ensayo de cono de arena para obtener la humedad y densidad de la capa previa. Posteriormente, esperar que el relave depositado llegue a la zona escogida y tomar una muestra del relave fresco depositado para obtener el C_p .
- Se delimita un punto de muestreo, realizando una excavación rectangular de un tamaño superior al del muestreador.

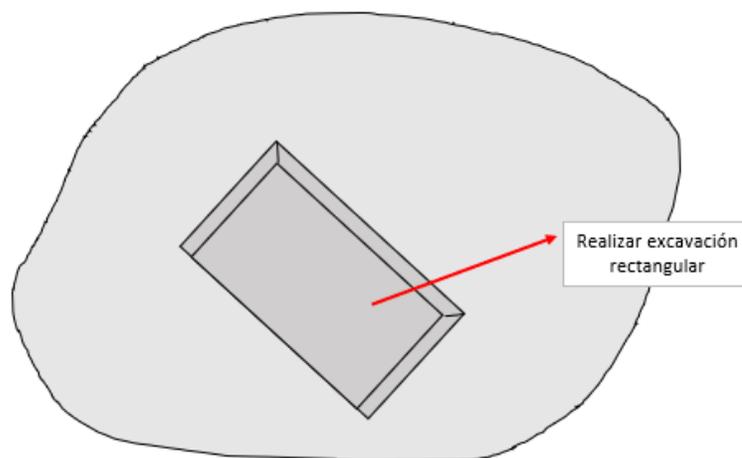


Figura G.1: Excavación en la zona donde se muestrearé relave

- Una vez se realiza el tallado, se desliza en el contacto con la capa previa una lámina de metal, esta lámina funciona como tapa (base) del muestreador cilíndrico y diferencia la capa depositada.

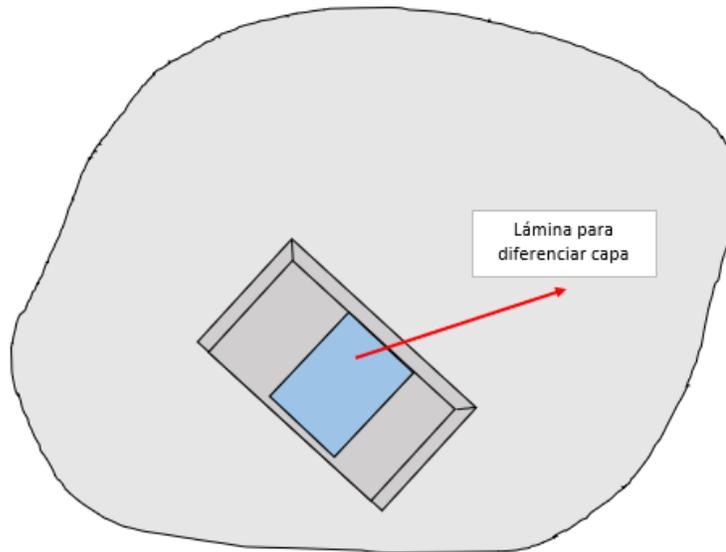


Figura G.2: Lámina diferenciadora de capas de relave.

- Se ubica y se inserta el muestreador cilíndrico sobre el relave. Una vez se encuentre situado, se introduce la brocheta de madera perpendicularmente a la lámina base y se marca donde quede descubierto, posteriormente, se retira la varilla y se mide con huincha la marca realizada. Esta medida corresponde a la altura de la capa.

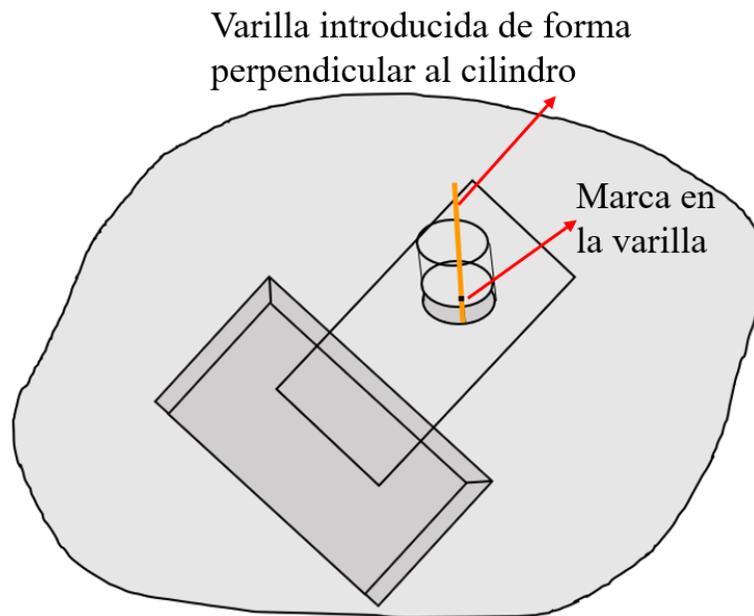


Figura G.3: Cilindro y varilla introducida en la capa de relave.



Figura G.4: Medida de altura de capa con brocheta y huincha.

- Después de registrar la altura, se talla el contorno del muestreador hasta descubrir completamente la lámina de metal.

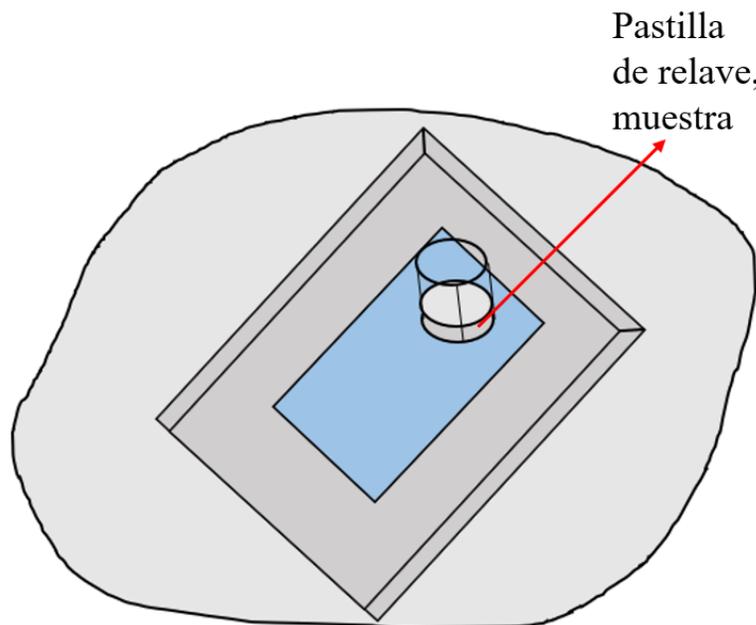


Figura G.5: Pastilla de relave con muestra.

- Se levanta la lámina de metal con el cilindro y el relave dentro, masando el conjunto cilindro + relave.
- Posteriormente, la muestra obtenida se sella en una bolsa y en laboratorio se obtiene el contenido de humedad.