

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería civil Metalúrgica

**PROFESORES PATROCINANTES**  
PhD. Fernando Betancourt C.

**Diseño y validación del estudio de escurrimiento en bandeja para suspensiones con esferas de vidrio y relave.**



**Camila E. Palma Castro.**

Informe de Memoria de Título para optar al Título de  
Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril 2018

## Resumen

La escasez del agua que debe afrontar la industria minera ha obligado a mejorar la eficiencia en el uso del agua, por ejemplo reutilizar la gran concentración de esta que componen sus múltiples procesos a la hora de obtener el cobre. La concentración de los minerales deja una considerables cantidades de efluentes los cuales se depositan generalmente en un tranque de relaves, en esta enorme estructura es donde empresas mineras tratan de recuperar gran cantidad de agua para ser recirculada al proceso.

La presente investigación tiene como finalidad diseñar y validar la simulación de escurrimiento de pulpa en una bandeja, todo esto a escala de laboratorio. Para este método se consideraron ciertas variables que sí podrían afectar la recuperación de agua como el porcentaje de sólidos de la pulpa, ángulo de inclinación de la bandeja y la distribución de tamaño de partículas (PSD) en esferas de vidrio Ballotini, y pruebas con relave donde se varió el porcentaje de sólidos en la entrada y el ángulo de inclinación. En este estudio se observó el comportamiento de la capa de sedimento formado, como se distribuyen las partículas a lo largo de la bandeja, en que afecta su densidad y empaquetamiento la distribución en la entrada (esferas de vidrio). En las pruebas con relave se observó el comportamiento del perfil de escurrimiento mediante herramientas computacionales.

El resultado de este trabajo trajo consigo la validación del diseño inicial de los experimentos donde hubo reproducibilidad en las pruebas hechas, donde en el caso de las pruebas con esferas Ballotini el comportamiento de las pulpas, la distribución de tamaño de partículas que se forma en la capa escurrida sigue una lógica de empaquetamiento de las partículas. En el caso de las prueba de escurrimiento hechas con relave se pudo concluir que para un porcentaje de solidos menor a 65% era necesario que el diseño de la estructura de la bandeja fuese de al menos 2 metros de largo.

## **Abstract**

Water scarcity pose grave risks to the mining industry, which in the last decades has been the motivation behind the research of new methods for water reutilization within the extraction and purification processes. Particularly, when it comes to the copper mining industry, most of the water that is recovered and fed back into new processes comes from the Tailing Dam. This massive structure is where effluent lines, carrying important amounts of various mineral traces mixed with water and other substances, discharge and accumulate.

The present research was conducted to design and validate the lab scale simulation of pulp suspension flow over an inclined rectangular tray, process that play a significant role in the water recovery process. In order to characterize this, the impact of variables like percent of solids in the flow, tilt angle of the tray and the particle size distribution (PSD) was studied, this last one with the use of Ballotini® glass beads. Additionally, tests with actual mining tails were conducted, in this case varying the presence of solids in the inlet and the inclination angle of the tray. Consequently, the behavior of the resulting layer over the surface, the particle distribution over the tray, and the impact over the density and package setup of the glass beads was studied in detail. In the case of the tailings tests, the behavior of the flow profile was analyzed with the use of computational tools.

Through the attained results we were able to validate the initial experimental setups where reproducibility was observed. In the case of glass beads, the pulp behavior and the particle size distribution of the formed layer over the tray, follows a clear and logical particle packaging trend. In other hand, in the case of tests where tailings were used, was concluded that for flows with a solid percentage lower than 65%, the design of an experiment setup with a tray of at least 2 meters of length was imperative for feasible results.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	II
<b>A. ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	V
<b>B. ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	VIII
<b>C. ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	IX
<b>D. NOMENCLATURA</b> .....	X
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO</b> .....	2
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	3
3.1 RELAVES.....	3
3.1.1. <i>Tranque de relaves</i> .....	3
3.1.2. <i>Métodos de construcción de los tranques de relave</i> .....	4
a) <i>Método de construcción aguas arriba</i> .....	5
b) <i>Método de construcción aguas abajo</i> .....	6
c) <i>Método de construcción de línea central</i> .....	6
3.2 POROSIDAD.....	7
3.3 REOLOGÍA .....	12
3.3.1 <i>Tipos de fluidos</i> .....	14
3.3.2 <i>Modelos reológicos para fluidos</i> .....	15
3.4 FORMACIÓN DE ÁNGULOS DE PLAYA .....	16
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	21
4.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES: .....	21
4.1.1. <i>Densidad real del sólido:</i> .....	21
4.1.2. <i>Granulometría</i> .....	21
4.1.3. <i>Difracción de rayos X</i> .....	21
4.1.4. <i>Características reológicas</i> .....	22
4.2. MÉTODO .....	23

4.2.1	<i>Caracterización de aguas claras</i> .....	23
4.2.2	<i>Pruebas en bandeja</i> .....	27
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	<b>39</b>
5.1	CARACTERIZACIÓN DE AGUAS CLARAS: .....	39
5.2	PRUEBAS REOLÓGICAS. ....	39
5.3	PRUEBAS EN BANDEJA .....	42
5.3.1	<i>Pruebas con esferas Ballotini</i> .....	43
5.3.2	<i>Pruebas con relave</i> .....	54
a)	<i>Resultados grabación de pruebas.</i> .....	54
b)	<i>Resultados extrapolación de perfil de escurrimiento</i> .....	60
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>68</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>69</b>



## A. ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1: TRANQUE DE RELAVES (3).	4
FIGURA 3.2: CONSTRUCCIÓN DEL MURO (3).	4
FIGURA 3.3: MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN AGUA ARRIBA (1).	5
FIGURA 3.4: MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN AGUA ABAJO (1).	6
FIGURA 3.5: MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN LÍNEA CENTRAL (1).	7
FIGURA 3.6: VARIACIÓN DE LA POROSIDAD RESPECTO A LA COMPOSICIÓN DE MEZCLAS BIMODALES CON VARIACIÓN DE LAS RELACIONES DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS (5).	10
FIGURA 3.7: EMPAQUE OPTIMO MEDIANTE LA MEZCLA DE PARTÍCULAS GRANDES Y PEQUEÑAS (5).	11
FIGURA 3.8: RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD MÁXIMA DEPENDIENDO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA (6).	12
FIGURA 3.9. PERFIL DE VELOCIDADES QUE ADQUIERE UN FLUIDO EN CONTACTO CON DOS PLACAS (8).	13
FIGURA 3.10. ESFUERZO CORTANTE VS VELOCIDAD DE CIZALLE PARA 2 FLUIDOS NEWTONIANOS (8).	14
FIGURA 3.11. DIAGRAMA REOLÓGICO PARA DISTINTOS FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO (7).	16
FIGURA 3.12. ESQUEMA DE DEPOSICIÓN PARA UN RELAVE CONVENCIONAL (9).	17
FIGURA 3.13. ESQUEMA DE DEPOSICIÓN PARA UN RELAVE ESPESADO (9).	17
FIGURA 4.1: PICNÓMETRO DE 50 CM <sup>3</sup> .	21
FIGURA 4.2: REÓMETRO DE CILINDROS COAXIALES.	22
FIGURA 4.3: (A) VISCOSÍMETRO CAPILAR CANNON-FENSKE.	24
FIGURA 4.4: BAÑO DE MEDICIÓN VISCOSIDAD.	25
FIGURA 4.5: (A) FRASCO QUE INGRESA AL TURBÍDIMETRO.	26
FIGURA 4.6: (A) VISTA FRONTAL DE LA BANDEJA CON SUS RESPECTIVAS DIMENSIONES	27
FIGURA 4.7: ALIMENTADOR CÓNICO CON DIMENSIONES [MM].	28
FIGURA 4.8: CAPA SIMÉTRICA FORMADA EN LA BANDEJA.	29
FIGURA 4.9: CAPA DE RELAVE EN BANDEJA.	31
FIGURA 4.10: PUNTOS X(T) E Y(T) A TOMAR DEPENDIENDO DEL TIEMPO DE ESCURRIMIENTO DE PULPA.	33
FIGURA 4.11: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE UNA EXPERIENCIA EJEMPLO.	34
FIGURA 4.12: IMAGEN TOMADA POR UN MICROSCOPIO DE UNA PRUEBA CON ESFERAS BALLOTINI CON UNA MEZCLA 50% 1180 [UM] Y 50% 600 [UM] EN LA COORDENADA (25,15).	35
FIGURA 4.13: ESFERAS DE 1180 [UM] ANTES DE LA COLORACIÓN.	36
FIGURA 4.14: (A) BANDEJA CON MATERIAL LUEGO DEL PRIMER SECADO.	37
FIGURA 4.15: (A) ESFERAS DE 1180 [UM] COLOR VERDE.	38
FIGURA 5.1: CURVAS REOLÓGICAS DE RELAVE LOS BRONCES CON UN 52% DE PORCENTAJE EN SÓLIDOS.	40
FIGURA 5.2: CURVAS REOLÓGICAS DE RELAVE LOS BRONCES CON UN 60% DE PORCENTAJE EN SÓLIDOS.	41
FIGURA 5.3: CURVAS REOLÓGICAS DE RELAVE ODS CON UN 52% DE PORCENTAJE EN SÓLIDOS.	41

FIGURA 5.4: CURVAS REOLÓGICAS DE RELAVE ODS CON UN 60% DE PORCENTAJE EN SÓLIDOS.....	42
FIGURA 5.5: TOMA DE MUESTRAS POR COORDENADAS.....	43
FIGURA 5.6 : REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 1 Y 2.....	45
FIGURA 5.7: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 3 Y 4.....	46
FIGURA 5.8: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 5 Y 6.....	47
FIGURA 5.9: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 7 Y 8.....	48
FIGURA 5.10: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 9 Y 10.....	49
FIGURA 5.11: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 11 Y 12.....	50
FIGURA 5.12: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 13 Y 14.....	51
FIGURA 5.13: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 15 Y 16.....	52
FIGURA 5.14: REPRESENTACIÓN DISTRIBUCIÓN DE DENSIDADES PRUEBA N° 17 Y 18.....	53
FIGURA 5.15: PERFILES DE AVANCE CADA 0.033S DE UNA PULPA DE 52% EN SÓLIDOS A 3° DE INCLINACIÓN. .....	54
FIGURA 5.16: PERFILES DE AVANCE CADA 0.33S DE UNA PULPA DE 60% EN SÓLIDOS A 3° DE INCLINACIÓN. .....	55
FIGURA 5.17: PERFILES DE AVANCE CADA 0.033S DE UNA PULPA DE 52% EN SÓLIDOS A 5° DE INCLINACIÓN. .....	56
FIGURA 5.18: PERFILES DE AVANCE CADA 0.33S DE UNA PULPA DE 60% EN SÓLIDOS A 5° DE INCLINACIÓN. .....	56
FIGURA 5.19: PERFILES DE AVANCE CADA 0.033S DE UNA PULPA DE 52% EN SÓLIDOS A 7° DE INCLINACIÓN. .....	57
FIGURA 5.20: PERFILES DE AVANCE CADA 0.033S DE UNA PULPA DE 60% EN SÓLIDOS A 7° DE INCLINACIÓN.....	58
FIGURA 5.21: GRAFICO ÁREA DE FORMACIÓN DE CAPA V/S TIEMPO.....	59
FIGURA 5.22: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE 52% EN SÓLIDOS DEPENDIENDO DEL TIEMPO CON 3° DE INCLINACIÓN CON DUPLICADO.....	60
FIGURA 5.23: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE 60% EN SÓLIDOS DEPENDIENDO DEL TIEMPO CON 3° DE INCLINACIÓN CON DUPLICADO.....	61
FIGURA 5.24: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE 52% EN SÓLIDOS DEPENDIENDO DEL TIEMPO A 5° DE INCLINACIÓN.....	62
FIGURA 5.25: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE 60% EN SÓLIDOS DEPENDIENDO DEL TIEMPO A 5° DE INCLINACIÓN.....	63
FIGURA 5.26: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE 52% EN SÓLIDOS DEPENDIENDO DEL TIEMPO A 7° DE INCLINACIÓN CON DUPLICADO.....	64

FIGURA 5.27: PERFIL DE AVANCE DE PULPA DE 60% EN SÓLIDOS DEPENDIENDO DEL TIEMPO A 7° DE INCLINACIÓN CON DUPLICADO..... 65

FIGURA 8.1: PICNÓMETRO DE 50 CM<sup>3</sup>..... 69

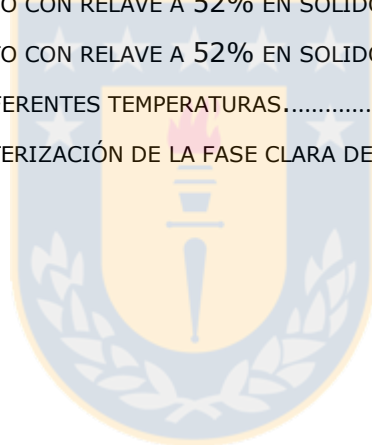
FIGURA 8.2: DESECADOR DE LABORATORIO DE VIDRIO..... 70





## B. ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: DIÁMETRO DE PARTÍCULA TAMICES. ....	30
TABLA 2: PARÁMETROS REOLÓGICOS RELAVE LOS BRONCES CON UN 52% EN SÓLIDOS.....	40
TABLA 3: PARÁMETROS REOLÓGICOS RELAVE LOS BRONCES CON UN 60% EN SÓLIDOS.....	40
TABLA 4: PARÁMETROS REOLÓGICOS RELAVE ODS CON UN 52% EN SÓLIDOS.....	41
TABLA 5: PARÁMETROS REOLÓGICOS RELAVE ODS CON UN 60% EN SÓLIDOS.....	42
TABLA 6: EXPERIMENTOS REALIZADOS CON MEZCLA BI-DISPERSA.....	43
TABLA 7: RESULTADOS DE LA POROSIDAD Y DENSIDAD APARENTE PRUEBA N°1. ....	44
TABLA 8: PRUEBA DE ESCURRIMIENTO CON RELAVE A 52% EN SOLIDOS A 3° DE INCLINACIÓN.....	60
TABLA 9: PRUEBA DE ESCURRIMIENTO CON RELAVE A 60% EN SOLIDOS A 3° DE INCLINACIÓN.....	61
TABLA 10: PRUEBA DE ESCURRIMIENTO CON RELAVE A 52% EN SOLIDOS A 5° DE INCLINACIÓN.....	62
TABLA 11: PRUEBA DE ESCURRIMIENTO CON RELAVE A 60% EN SOLIDOS A 5° DE INCLINACIÓN.....	63
TABLA 12: PRUEBA DE ESCURRIMIENTO CON RELAVE A 52% EN SOLIDOS A 5° DE INCLINACIÓN.....	64
TABLA 13: PRUEBA DE ESCURRIMIENTO CON RELAVE A 52% EN SOLIDOS A 5° DE INCLINACIÓN.....	65
TABLA 14: DENSIDAD DEL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	70
TABLA 15: RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA FASE CLARA DE RELAVE ODS Y LOS BRONCES.....	75



## C. ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 : DENSIDAD REAL DEL SÓLIDO .....	69
ANEXO 2: GRANULOMETRÍA .....	72
ANEXO 3: DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE AGUA CLARA:.....	72
ANEXO 4: PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA EL SEDIRACK. ....	73
ANEXO 5: EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE LA FASE CLARA RELAVE ODS Y LOS BRONCES. ....	74
ANEXO 6 : RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA FASE CLARA.....	75



## D. NOMENCLATURA

$\tau$  = Esfuerzo de corte [Pa].

$\mu$  = Viscosidad dinámica [Pa·s].

$\dot{\gamma}$  = Velocidad o tasa de deformación [s<sup>-1</sup>].

$\frac{dv}{dy}$  : Gradiente de velocidades

$\tau_0$  : Esfuerzo cortante inicial

$\mu_\infty$  : Viscosidad dinámica [kg/ms]

$\dot{\gamma}$  : Gradiente de velocidades

$\rho_p$  = Densidad de la mezcla (pulpa)[kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_L$  = Densidad de la fase líquida [kg/m<sup>3</sup>].

$\rho_s$  = Densidad de la fase sólida [kg/m<sup>3</sup>].

$\varphi$  = Fracción volumétrica de sólidos

$\rho_s$  = Densidad de sólido

$V_{poro}$  = volumen del poro

$V_T$  = volumen total de la roca

$V_{matriz}$  = volumen de las partículas sólidas que contienen la roca

$W_{seco}$  = peso seco total de la roca

$\rho_{matriz}$  = densidad media de los minerales de la matriz

$e$  = Relación de huecos

$S$  = Grado de saturación

$\eta$  = Porosidad

$M$  = módulo de distribución (Rosin -Rammler)

$F$  = % Pasante acumulado para un tamaño  $x$

$y(t)$  = Posición vertical de la suspensión sobre la bandeja (en función del tiempo)

$x(t)$  = Posición horizontal de la suspensión sobre la bandeja (en función del tiempo)

$K_y$  = Valor máximo vertical en estado estacionario para suspensión sobre la bandeja (mm)

$K_x$  = Valor máximo horizontal en estado estacionario para la suspensión sobre la bandeja [mm]

$t$  = tiempo (s)

$\tau_y$  = tiempo cuando se alcanza el 63.2% de  $K_y$  (s)

$\tau_x$  = tiempo cuando se alcanza el 63.2% de  $K_x$  (s)

$V_y(t)$  = Velocidad vertical de la suspensión sobre la bandeja (mm/s)

$V_x(t)$  = Velocidad horizontal de la suspensión sobre la bandeja (mm/s)

$\frac{A}{L}$  = Razón ancho/largo



# 1. Introducción

Chile es mundialmente conocido como un país minero, por lo que es de conocimiento general que esta industria ha sido parte importante del desarrollo de nuestra nación, para que esto continúe y prospere es necesario considerar las limitaciones que han ido surgiendo en la industria minera al paso de los años. El uso del agua juega un papel fundamental en la producción y obtención del cobre, es por eso que es de suma importancia concientizar y encontrar formas de uso más eficientes de este recurso tan valioso y no renovable.

En la minería unos de los métodos de concentración más importante es la flotación, este proceso genera desechos sólidos que se encuentran suspendido en pulpas llamados relaves. La cantidad de desechos que deja la flotación es tal que es necesario construir un depósito que los almacene de forma segura, porque si bien los relaves no son tóxicos para la vida, hay ciertas sustancias que originan reacciones con el agua y se comienzan a solubilizar, estas sustancias pueden generar un grado de contaminación al medioambiente, es aquí donde nace la importancia de tener una normativa que regule las operaciones de los depósitos de relaves.

En el transporte de pulpa, la depositación hidráulica de la suspensión en el tranque de relaves se desplaza hacia el centro de este, esto se debe a la gravedad puesto que el flujo generado se mueve de un lugar de mayor a menor altura, mientras ocurre el movimiento de la pulpa se produce una sedimentación de partículas que forman superficies inclinada denominada playas. es muy importante conocer la naturaleza de la depositación, puesto que será muy importante a la hora de optimizar el proceso de recuperación de agua.

## **2. Objetivo**

### **2.1. Objetivo general**

Diseñar un montaje experimental para el estudio de fenómenos de transporte asociados al escurrimiento de relaves y validar una metodología de medición a través de pruebas escurrimiento de relave y mezclas bi-dispersas de esferas Ballotini.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y dimensionar un equipo para validar estudio de pruebas de escurrimiento en materiales de relave y esferas de vidrio Ballotini.
- Validar la metodología experimental a través de la realización de pruebas, variando la granulometría de entrada de mezclas bi-dispersas de esfera Ballotini, y el ángulo de inclinación y % sólidos en relave.
- Realizar estudios de la distribución en tamaño y % en sólidos en la capa depositada en esferas Ballotini.
- Implementar una metodología para el estudio de perfiles de avance empleado en relaves a través de un análisis de imagen.

## **3. Marco Teórico**

### **3.1 Relaves**

Es de conocimiento general la necesidad de tener mayor conciencia sobre el tratamiento correcto de los desechos que genera la minería, dentro de los genera más impacto ambiental y económico son los relaves, son desechos de roca molida, sales metálicas, arcillas y otras especies que dependerán de la génesis del yacimiento donde se procesa el mineral.

La flotación produce residuos sólidos los cuales se encuentran suspendidos en líquido, lo que hace que exista una interacción sólido-líquido importante. La cantidad de relaves que genera la flotación es tal, que se debe construir un deposito que almacene toda la formación de dichos desechos, estos relaves cabe destacar no son tóxicos, pero la toxicidad aparece luego de estar depositados debido que hay ciertos componentes que reaccionan con el agua y solubilizan elementos que para el humano son tóxicos como el arsénico, cianuro, cobre, cinc, plomo, cromo, etc. Existe una normativa que regulan las operaciones de los tranques de relaves (1).

#### **3.1.1. Tranque de relaves**

Es una construcción que se utiliza para contener de forma segura estos desechos. El tranque está formado por una muro de contención, construido normalmente con la fracción gruesa de los relaves, y una cubeta Figura 3.1. En la cubeta las partículas finas sedimentan y se forma una laguna de aguas claras (2).



Figura 3.1: Tranque de relaves (3).

### 3.1.2. Métodos de construcción de los tranques de relave

El tranque se construye en el inicio, de un pequeño muro con material empréstito, para luego dar paso a hidrociclones que descargan los gruesos y así formar el muro, mientras que las partículas finas se deposita en la cubeta dando paso así a lo que se llama lamas.



Figura 3.2: Construcción del muro (3).



### a) Método de construcción aguas arriba

Consiste en un muro inicial (starter dam) construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la depositación de los relaves, utilizando hidrociclones. la fracción más gruesa o arena, se descarga por el flujo inferior del hidrociclón (Underflow) y se deposita junto al muro inicial, mientras la fracción más fina o lamas, que sale por el flujo superior del hidrociclón (Overflow) se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, que pueden ser las denominadas torres de evacuación, o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante. Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada.

Con este método, en la práctica, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros (Figura 3.3). Si bien este método es el que requiere un menor volumen de material arenoso, por lo que ha sido utilizado en la pequeña minería para construir numerosos tranques, es el que produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas.

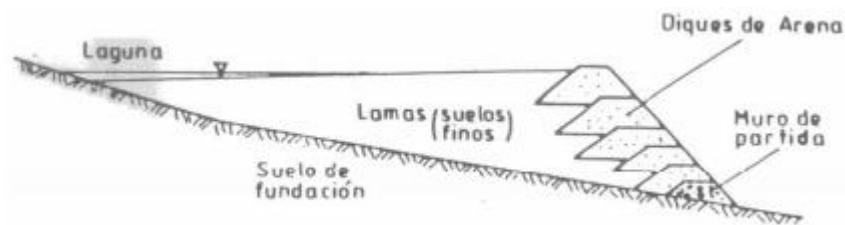


Figura 3.3: Método de construcción agua arriba (1).

## b) Método de construcción aguas abajo

La construcción se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena cicloneada hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba. Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente (usualmente 2 a 4 m), se efectúa el levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y peralte del muro. A veces se dispone también de un segundo muro pre-existente aguas abajo. Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el manto del talud del muro de partida, o bien, disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida.

Este método de aguas abajo requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica.



Figura 3.4: Método de construcción agua abajo (1).

## c) Método de construcción de línea central

El Método de línea central o Mixto se inicia al igual que los métodos anteriores con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba. Una vez completado el vaciado de arenas y lamas correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Lo que permite lograr un muro de arenas cuyo eje se mantiene en

el mismo plano vertical, cuyo talud de aguas arriba es más o menos vertical, y cuyo talud de aguas abajo puede tener la inclinación que el diseño considera adecuada. Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los 2 métodos anteriores, y permite lograr muros suficientemente estables.

La inseguridad que muchas veces despiertan los tranques de arenas de relave no deben atribuirse al material con que se construyen, sino al sistema de construcción por relleno hidráulico que puede inducir elevadas presiones de poros e incluso la licuefacción total en caso de un sismo. Sin embargo, las técnicas modernas de diseño, construcción y control permiten obtener estructuras seguras a base de buenos sistemas de drenaje, de un eficiente sistema de ciclonaje y disposición de las arenas, y también de una buena compactación de la arena que permita alcanzar una elevada densidad, utilizando un equipo adecuado para ello. Lo anterior, complementado con un control piezométrico en el cuerpo del prisma resistente, deja al tranque de arenas de relave en condiciones de estabilidad semejante al de otras obras de Ingeniería de Importancia.

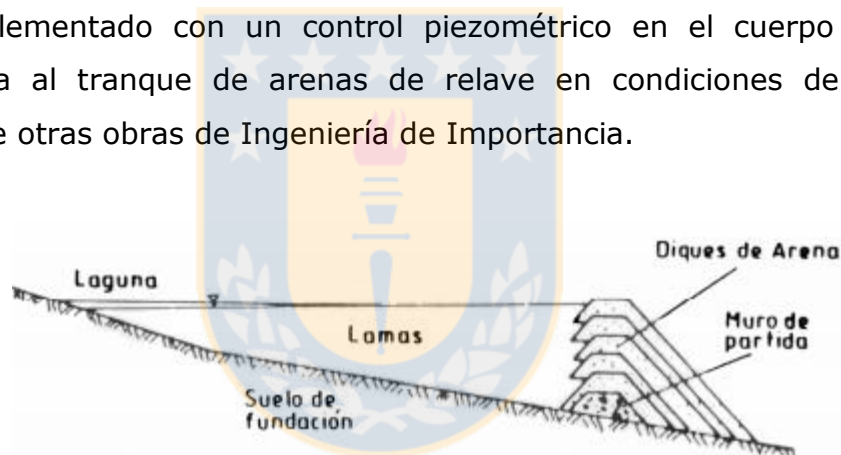


Figura 3.5: Método de construcción línea central (1).

### 3.2 Porosidad

Uno de los aspectos fundamentales en el transporte y depositación de relave es la porosidad. Al controlar este parámetro se puede mejorar y obtener niveles óptimos de recuperación de agua. La porosidad de una roca es la fracción de volumen de espacio entre las partículas sólidas en comparación al volumen total de la roca, estos espacios incluyen todos los poros, canales y ramificaciones inter e

intra-cristalinas. La porosidad convencionalmente se representa con el símbolo  $\phi$  y se expresa ya sea como una fracción que varía entre 0 y 1 o un porcentaje que varía entre 0% y 100% (4).

La porosidad es calculada bajo la siguiente relación:

$$\phi = \frac{V_{poro}}{V_T} = \frac{V_T - V_{matriz}}{V_T} = \frac{V_T - (W_{seco}/\rho_{matriz})}{V_T} \quad (3.1)$$

Cabe destacar que el valor de la anterior relación, es decir el valor de la porosidad no entrega ninguna información específica como tamaño de poro, distribución y/o grado de conectividad. Por lo tanto existirán rocas con el mismo valor de porosidad pero pueden tener propiedades físicas muy distintas.

Generalmente cuando se trabaja con mezclas de partículas bimodales la principal preocupación recae en encontrar el empaquetamiento óptimo, aunque en los casos en que el estado del empaquetamiento se encuentra muy alejado de este óptimo, el proceso radica en estimar la densidad de empaquetamiento a través de la composición y tamaño de partícula (4).

Los empaquetamientos de partículas esféricas de monotamaño dejan espacios vacíos entre sí, por lo cual al añadir partículas de menor tamaño la mayoría de las veces se logra mejorar la densidad del empaque. Para que esto se logre de manera óptima es necesario que estos espacios sean llenados sin desplazar las partículas de mayor tamaño. En los casos en que la razón entre los tamaños de partícula se acerca a la unidad no hay incremento en la densidad debido a la mezcla. Para acercarse al óptimo se necesita una relación alta entre los tamaños, siendo los valores  $D_L/D_S$  superiores a 20 los más útiles.

Para un empaque ordenado, el diámetro necesario para la esfera que llenará los intersticios disminuye a medida que la coordinación de las partículas aumenta. Para empaquetamiento óptimo el número de partículas pequeñas incrementa mientras el tamaño relativo entre estas disminuye. Sin embargo, si el empaque no

es ordenado entonces la densidad real del empaque tendera a ser menor que la predicha teóricamente.

### **Modelo cuantitativo de un empaque óptimo**

La densidad máxima del empaque para una mezcla bimodal de esferas corresponde al punto de menor volumen específico, el cual es llamado punto de saturación. En un estado de empaque optimo o saturado, las partículas de mayor tamaño están en contacto unas con otras mientras todos los intersticios están llenos de partículas pequeñas. Encontrar la composición de saturación en términos de la fracción másica de partículas grandes  $X_L^*$  es el objetivo del modelo cuantitativo. La fracción de partículas grandes a cualquier composición está dada por:


$$X_L = W_L / (W_L + W_S) \quad (3.2)$$

Con el sufijo  $L$  y  $S$ , se denominan las partículas grandes y pequeñas respectivamente y  $W$  indica el peso. El peso de las partículas grandes es calculado mediante la densidad teórica  $\rho_L^*$  y la fracción de empaque  $f_L$ .

$$W_L = f_L \cdot \rho_L^* \quad (3.3)$$

La cantidad de espacios vacíos es igual a  $(1 - F_L)$ . Así para  $W_S$  se tiene

$$W_S = (1 - F_L) f_S \cdot \rho_S^* \quad (3.4)$$

$$X_L^* = \frac{f_L \cdot \rho_L}{f_L \cdot \rho_L + (1 - f_L)f_S \cdot \rho_S} \quad (3.5)$$

Para el caso típico, en que las dos partículas de la mezcla tienen la misma naturaleza, el cálculo de la fracción óptima  $X_L^*$  solo depende de la fracción de empaque de ambos componentes.

$$X_L^* = \frac{f_L}{f_L + (1 - f_L)f_S} \quad (3.6)$$

En el caso en que las partículas tienen la misma fracción de empaque la ecuación puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$X_L^* = \frac{1}{2 - f_L} \quad (3.7)$$

### Efectos de la porosidad y la razón de tamaño de partícula

Al analizar las ecuaciones anteriores, se puede ver que existe una sensibilidad a la porosidad inicial de las partículas en términos de la composición en el punto de densidad máxima para el empaque. Para mezclas binarias de esferas, la cantidad de partículas pequeñas en el punto de saturación varía con la porosidad de los constituyentes puros.

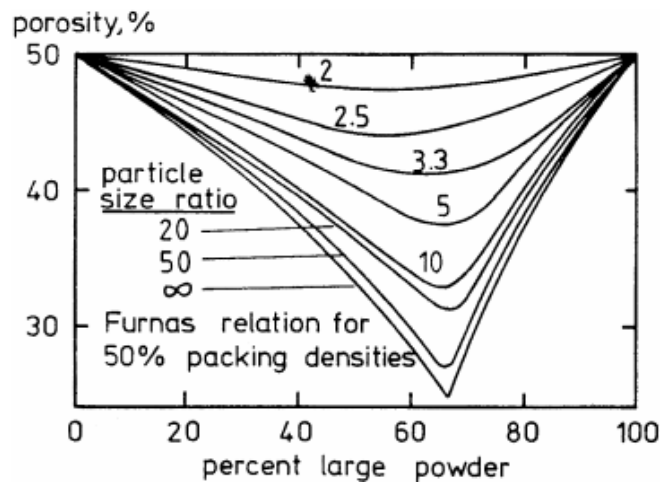


Figura 3.6: Variación de la porosidad respecto a la composición de mezclas bimodales con variación de las relaciones de tamaño de partículas (5).

En la Figura 3.6 se muestra la relación entre la porosidad de mezclas versus el porcentaje de partículas grandes, asumiendo que los polvos tienen una fracción de empaque inherente de 0.5. Se presentan los efectos de la composición y la relación entre tamaños de partícula en la porosidad del empaque. Cuando se tienen partículas con tamaños grandes, el valor mínimo de porosidad del empaque ocurre en mezclas más abundantes. El mínimo para la porosidad se va posicionando más cerca de las mezclas más abundantes en partículas pequeñas y va creciendo a medida que la relación entre los tamaños de partícula disminuye (5).

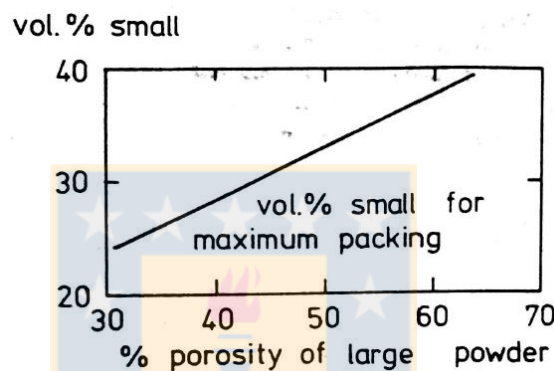


Figura 3.7: Empaque óptimo mediante la mezcla de partículas grandes y pequeñas (5).

La Figura 3.7 muestra una relación entre la densidad de empaque inherente de las partículas grandes y la cantidad necesaria de partículas pequeñas para alcanzar el empaque óptimo (5). Como es de esperar, la cantidad de polvo fino necesario para alcanzar el óptimo crece de manera lineal con la porosidad de las partículas grandes. En otras palabras, se asume que las partículas grandes actúan como un lecho en donde las partículas pequeñas llenan los espacios vacíos.

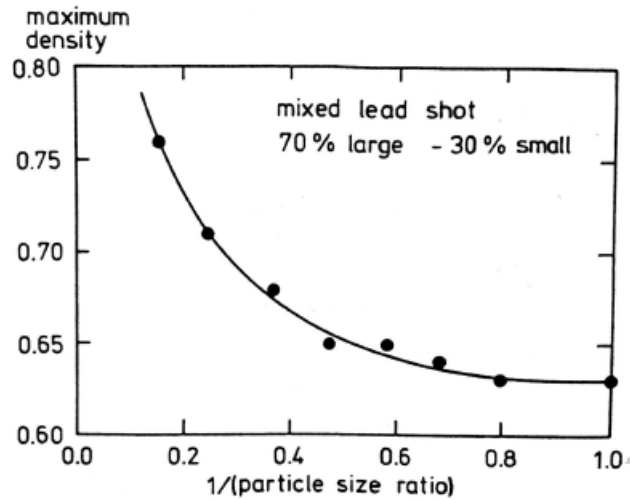


Figura 3.8: Relación entre la densidad máxima dependiendo del tamaño de partícula (6).

Como se menciona anteriormente, la densidad del empaque no aumenta si las partículas son del mismo tamaño. Por el contrario, se obtiene un efecto máximo en el empaque a medida que la diferencia entre los tamaños de partícula crece. En la Figura 3.8 se presenta data experimental para mezclas de partículas esféricas con diferentes relaciones entre sus tamaños. La fracción de densidad del empaque es graficada en contra del inverso de la razón de tamaños de partículas  $\left(\frac{D_L}{D_S}\right)$ . Debido a que la densidad de empaque más alta para el caso binario ocurre cuando las partículas grandes proveen un lecho fijo donde las pequeñas pueden llenar los espacios, mientras más pequeño sea el tamaño relativo de las partículas pequeñas mejor es el empaque (6).

### 3.3 Reología

Es el estudio de los movimientos físicos que regulan la deformación de los fluidos, es decir la reología estudia un vínculo existente entre la fuerza que se ejerce sobre un material y la acción que la hace fluir, este vínculo lo gobiernan distintas propiedades que se pueden analizar mediante un reómetro, el cual se encarga de controlar ciertas deformaciones midiendo los esfuerzos; a partir de este instrumento es posible medir viscosidad y coeficiente de esfuerzo normal de cada sustancia entre otras propiedades. Existen ecuaciones constitutivas que hacen



posible el establecimiento de un modelo acerca de la manera que se comportan las distintas sustancias.

La viscosidad está relacionada con la resistencia que coloca un fluido a ponerse en movimiento, todo esto aplicando esfuerzos cortantes al material. Esta propiedad solo se logra apreciar cuando un material está en movimiento; es decir, es la relación que existe entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. El concepto viscosidad se puede apreciar de una forma empírica (Figura 3.9) donde un fluido se encuentra entre dos placas una fija y la otra en movimiento. En la condición de borde se considera que la velocidad del fluido es la misma que la velocidad que adquiere la placa, con una placa inmóvil, esta velocidad es igual a cero y  $v$  es la velocidad con la que se mueve la placa (7).

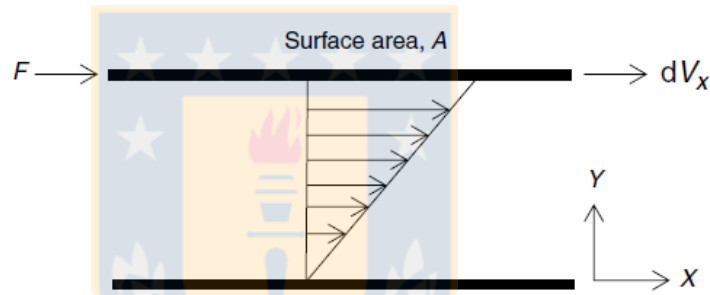


Figura 3.9. Perfil de velocidades que adquiere un fluido en contacto con dos placas (8).

Las propiedades reológicas pueden medirse a través de la deformación de una muestra, lo que es básicamente el cambio que se produce en la forma o tamaño del cuerpo a causa de la producción de esfuerzos internos que surgen como resultados de la aplicación de una o más fuerzas, a partir de esto se pueden medir otras propiedades.

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3.8)$$

### 3.3.1 Tipos de fluidos

a) *Fluidos newtonianos*: Son aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación. Algunos de ejemplos de estos fluidos son el agua, aire, gasolina, glicerina, etc. La viscosidad en este caso es independiente del gradiente de velocidad y puede depender de la temperatura como también de la presión. Para estos fluidos la viscosidad es función exclusivamente de la condición del fluido y la magnitud del gradiente no influye sobre la magnitud de la viscosidad dinámica.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (3.9)$$

Una gráfica (Figura 3.10) de esfuerzo cortante ( $\tau_{yx}$ ) vs velocidad de corte ( $\dot{\gamma}_{yx}$ ) cuya pendiente representa el  $\mu$  que es la viscosidad, esta curva pasa por el origen.

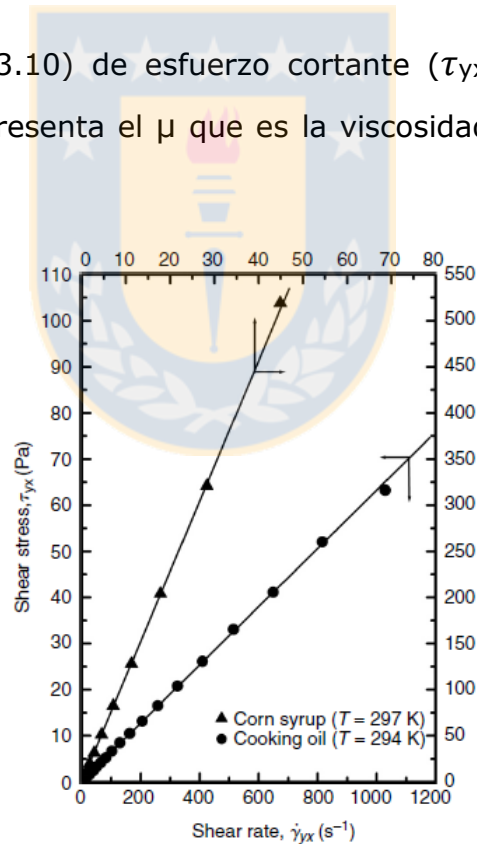


Figura 3.10. Esfuerzo cortante vs velocidad de cizalle para 2 fluidos newtonianos (8).

b) *Fluido no-newtoniano*: Se denomina como fluido no-newtoniano cuando la curva del flujo no es lineal, es decir cuando su viscosidad (esfuerzo cortante dividido por la velocidad de cizallamiento) no es constante a una temperatura y presión dada. Presenta una tensión normal no equivalente a un simple flujo de corte. El valor de la viscosidad dependerá de las condiciones de flujo, como geometría de este, la velocidad de cizalle desarrollada dentro del fluido, el tiempo de cizalladura, etc.

### 3.3.2 Modelos reológicos para fluidos

Es una descripción de la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de cizallamiento. La ley de viscosidad de newton es el modelo reológico que describe el comportamiento de un flujo de los modelos newtonianos, cabe decir que para fluidos no-newtonianos se ha desarrollado numerosos modelos con el fin de describir el comportamiento (Figura 3.11) de dichos fluidos, a continuación se conocen algunos de estos modelos.

*Ley de potencia*: esta ley sirve para modelar el comportamiento de fluidos pseudoplásticos y dilatantes donde la tasa de deformación  $\dot{\gamma}$  aumenta a medida que aumenta el esfuerzo de corte  $\tau$ .

$$\tau_{xy} = \mu \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (3.10)$$

Se debe considerar que para  $n=1$  el modelo es para un fluido newtoniano, para un  $0 < n < 1$  el modelo es para un fluido pseudoplástico y para  $n > 1$  el modelo es para un fluido dilatante.

*Modelo Bingham*: Es un modelo donde se exhibe un comportamiento lineal de esfuerzo cortante y velocidad de corte después de alcanzar un umbral inicial de esfuerzo cortante, los fluidos que obedecen a este modelo se denominan fluidos plásticos de bingham. El reómetro rotacional de indicación directa fue diseñado específicamente para aplicar el modelo de fluidos plásticos de bingham.

$$\tau = \tau_0 + \mu_{\infty} \dot{\gamma} \quad (3.11)$$

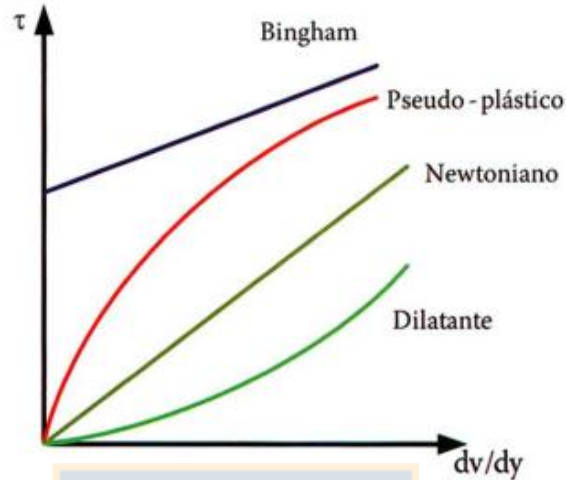


Figura 3.11. Diagrama reológico para distintos fluidos independientes del tiempo (7).

### 3.4 Formación de ángulos de playa

Uno de los aspectos más relevantes en la depositación de relaves en tranque es la formación de la pendiente de la playa esta se define como, la formación de la pendiente superficial que se constituye luego de la depositación hidráulica o mecánica del relave, la descarga tiene lugar en el extremo de la tubería que transporta dicho relave. Es necesario conocer la pendiente de la playa para calcular y obtener información como el valor del área de depositación, volumen de almacenamiento y lo más importante la vida útil del depósito. Se tiene claro que la predicción de la pendiente de la playa, el control de la evolución de la pila en los depósitos de relave es algo que aún se estudia, puesto que carece de información fiable acerca de estos parámetros.

Existen dos tipos de deposición de relaves

- Sub-aéreo: La superficie expuesta de los relaves entre el punto de descarga y el estanque sobrenadante, o hacia el punto más bajo dentro del área de almacenamiento se denomina playa.
- Sub-acuoso: Se depositan bajo el agua, esta genera una pendiente más alta debido a la mayor densidad del agua comparada con el aire, se generan condiciones de playa sumergida.

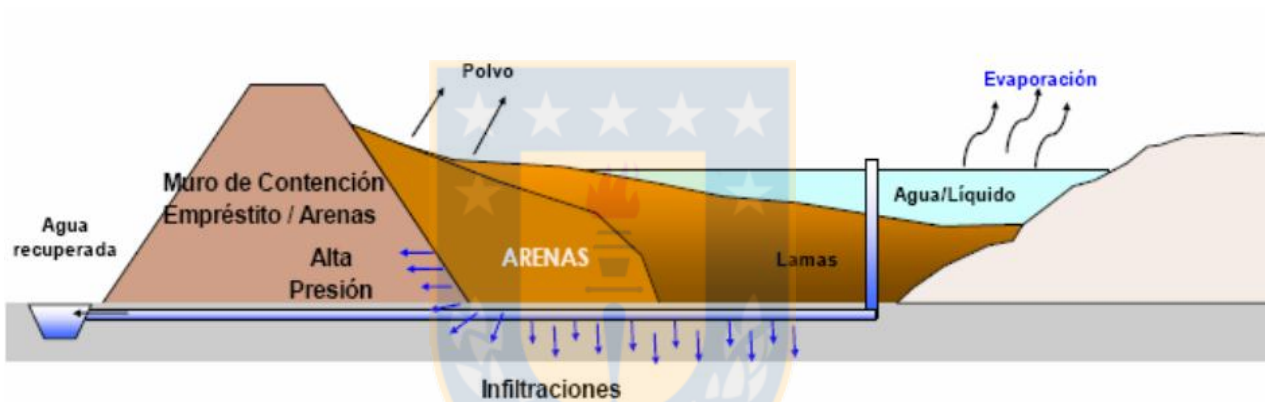


Figura 3.12. Esquema de deposición para un relave convencional (9).

En el caso de los relaves espesados (Figura 3.13); es decir, con porcentaje de sólidos entre 50% y 70% se aprecia que hay un aumento en la pendiente de la playa, se debe tener en consideración que la geometría de la pila ha sido menos estudiada. La altura de la pared de retención del perímetro o la huella de la instalación de almacenamiento pueden reducirse en comparación con un diseño de instalación convencional (Figura 3.12) (9).

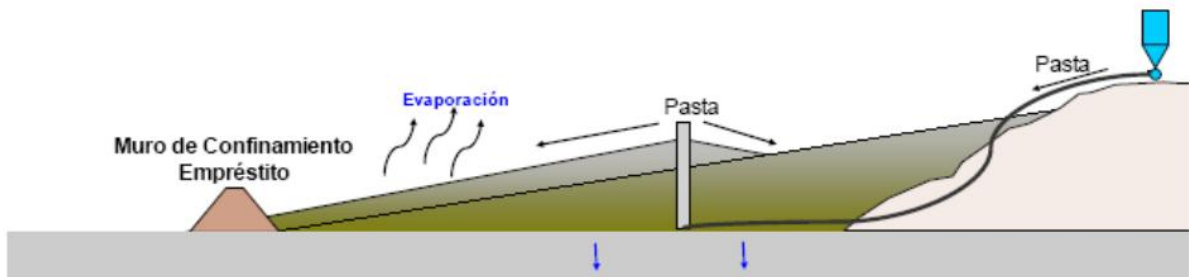


Figura 3.13. Esquema de deposición para un relave espesado (9).

La geometría de la pila no solo controla la capacidad de almacenamiento para una huella dada; también influye fuertemente en el rendimiento geotécnico y geo ambiental luego de la depositación, la predicción precisa en el diseño resulta difícil, pero a lo largo de los años ha mejorado. Cabe destacar que una pendiente demasiado suave aumenta significativamente la huella del embalse o requiere un aumento de la presa, en cambio una pendiente muy empinada ocasiona, la erosión y disminución de la estabilidad geotécnica de la pila. Se puede observar que la pendiente media de los depósitos es menor a las pruebas en laboratorio, esto se le atribuye al esfuerzo de cizalle que se produce en el transporte, pero las observaciones empíricas muestran que el comportamiento de los depósitos de relave espesados depende de la escala. Es decir, que los depósitos más jóvenes o más pequeños a menudo se caracterizan por un flujo de expansión relativamente uniforme y perfiles convexos de pendiente de playa, mientras que depósitos más antiguos o grandes los relaves fluyen en canales estrechos y el perfil de la pendiente de la playa puede ser cóncavo (10).

Cabe destacar que la gran variedad de teorías respecto a la predicción de la pendiente de la playa en un depósito de relave muestran que hay distintos estados posibles en los cuales se encuentran los relaves a medida que fluyen, estos pueden ser laminar, turbulento, supercrítico o subcrítico.

Fitton, (2007) modeló un flujo no-newtoniano de canal abierto y de transporte de sedimentos, este caso supone que la pendiente máxima de la playa es correspondiente a un caudal canalizado, donde la tendencia entre la erosión y la sedimentación alcanza el equilibrio, el equilibrio se caracteriza por la velocidad de transporte mínima de los relaves, que se puede determinar experimentalmente o en su defecto con las siguientes ecuaciones.

Para suspensiones segregadas, a partir de la ecuación de Wasp (1977):

$$V_c = 3.8(C_v)^{1/4} \left( \frac{d}{4R_h} \right)^{1/6} \left( \frac{8g \cdot (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

A través de un análisis de sensibilidad de la ec. 3.12 se determina que las predicciones eran insensibles a la forma del canal, y más bien la relación entre el ancho y la profundidad era un parámetro importante. Fitton recomendó usar una sección transversal parabólica con una relación ancho/profundidad de 5.5 para el cálculo del radio hidráulico ( $R_h$ ).

Para suspensiones no-segregadas, el modelo se basa básicamente en hacer correlacionar experimentalmente la velocidad crítica y el número de Reynolds para un plásico Bingham.

$$V_c(\text{no - segregantes}) = 0.145 \text{Ln} \left( \frac{\rho V R_h}{\mu_{BP}} \right) \quad (3.13)$$

Entonces se tiene lo siguiente:

- Se calcula  $V = \frac{Q}{A}$  donde la profundidad del canal es  $d$  y teniendo en cuenta que la sección transversal del canal es parabólico, el ancho que se utiliza es  $5.5 \cdot d$
- El radio hidráulico es calculado, la velocidad crítica se calcula mediante las ecuaciones anteriores, se recomienda hacerlo de 1 a 3 veces hasta que  $V_c = V$ .

Para un fluido de Herschel-Bulkley, el Reynolds se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Re_{HB} = \frac{8\rho v^2}{\tau_y + k \left(\frac{2v}{R_h}\right)^\eta} \quad (3.14)$$

- El Reynolds se utiliza para calcular el factor de fricción usando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\text{Log} \left( \frac{k_s}{14.8R_h} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3.15)$$

Con  $k_s = 2xD_{90}$

Para luego calcular la pendiente de playa para el flujo uniforme en el canal:



$$S_0 = \frac{fV^2}{8gR_h} \quad (3.16)$$



## 4. Metodología

### 4.1. Caracterización de materiales:

#### 4.1.1. Densidad real del sólido:

Para estimar la densidad del mineral se utilizó el método del picnómetro (Figura 4.1), una explicación más detallada se muestra en el Anexo 1.

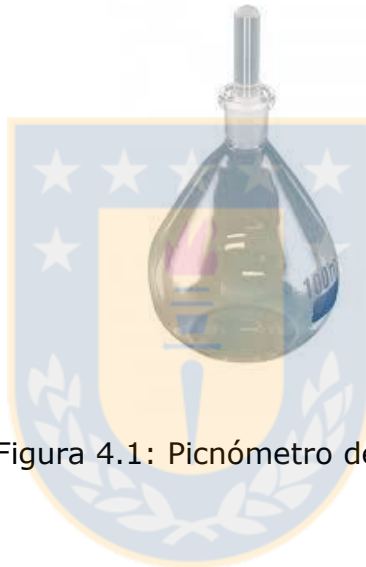


Figura 4.1: Picnómetro de 50 cm<sup>3</sup>

#### 4.1.2. Granulometría

Se emplearon dos métodos de análisis granulométrico la primera empleando tamices ASTM y el segundo empleando el equipo SYMPATEC HELOS VECTRA. En el Anexo 2 se muestra la metodología de ambos casos.

#### 4.1.3. Difracción de rayos X

Para identificar los componentes cristalinos del mineral se realizó un ensayo de difracción de rayos X (DRX) de la muestra original para lo cual se pulverizó la muestra bajo malla 100.

Las muestras se analizaron mediante un difractómetro con monocromador de Cu con filtro  $K\beta$  barrido de 2 a  $100^\circ$ , con pasos de  $2^\circ$  por minuto.

#### 4.1.4. Características reológicas

Para caracterizar los tipos de relave y ver su comportamiento reológicos se utilizó un reómetro de cilindros coaxiales (Figura 4.2), el cual el fluido se ubica en el espacio producido entre dos cilindros concéntricos (Figura 4.2). El dispositivo que se utilizó es conocido como modelo Searle, lo que significa que el cilindro exterior se encuentra fijo, mientras el cilindro interno se encuentra en movimiento rotacional con velocidad angular, dadas sucesivas mediciones se da paso a una curva reológica, que es básicamente interpretar el movimiento de las pulpas y esta adquiere una caracterización de cómo se mueve el fluido observando la deformación que tiene tal, midiendo distintas variables que afectarían al movimiento de la pulpa.

La condición inicial de los ensayos no utiliza floculante. Se prepara una pulpa a 52% y 60% de sólidos de ambos relaves a estudiar y se deja agitar dentro de un vaso precipitado de 100 ml por 3 minutos evitando que sedimenten partículas, posteriormente al homogeneizar la pulpa, se dispone a verter está dentro de la cámara donde se lleva a cabo la medición para luego ubicar dicha cámara en el reómetro y así comenzar la caracterización del material. La medición nos arroja curvas que se deben ajustar a un modelo de acuerdo a su comportamiento.

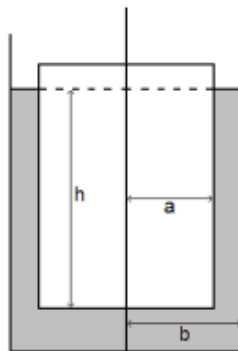


Figura 4.2: Reómetro de cilindros coaxiales.

## **4.2. Método**

### **4.2.1 Caracterización de aguas claras**

Para la caracterización de aguas claras fue necesario preparar el material ODS y el material de Los bronces antes de hacer las pruebas, el cual en este caso el laboratorio ya constaba con material preparado, es decir ambos tipos de materiales se encontraba homogeneizado luego de un proceso de roleo y cuarteo.

#### **a) Preparación muestras en el sedirack**

A partir de la determinación de la densidad del mineral se podrá conocer cuál es el peso que se necesita para preparar muestras de 52% y 60% en sólidos. La columna donde se preparan las muestras alcanzan un volumen de llenado de 1200 ml con esta información se obtuvo el cálculo que se encuentra en el anexo 2.

Finalmente se llega a una ecuación donde los datos son conocidos y es posible calcular la masa necesaria de relave que se necesita para ciertas conformaciones de pulpa a estudiar, en este caso son de 52% y 60% para la caracterización de aguas claras.

#### **b) Determinación de densidad de agua clara**

Para la determinación de densidad de la fase clara se toman muestras en vasos precipitados de 150 [ml] anteriormente tabulados según su porcentaje de sólidos que fue formada cada fase, cabe destacar que se deben hacer las pruebas continuamente luego de la toma de muestra, de lo contrario se obtendrían resultados con mucho error experimental, uno de los más significativos sería la sedimentación de algunas partículas que se encontraban en dicha fase.

Luego de tomar la muestra ésta se vierte en un picnómetro de 50 [cm<sup>3</sup>] previamente pesado hasta que por el capilar de la tapa se derrame un poco de líquido, teniendo el picnómetro lleno se debe pesar para que posteriormente se determine la densidad del líquido como se ve en el Anexo 3.

Luego de pesar el picnómetro lleno se recupera el líquido en los vasos precipitados, se lava el picnómetro y luego con la ayuda de una estufa se seca para luego repetir con los otros ensayos, se debe tener cuidado de que el picnómetro se encuentre limpio y seco a la hora de proceder a estimar las otras densidades.

**c) Determinación de viscosidad de agua clara**

La determinación de la viscosidad de la fase clara se hace con la ayuda de un viscosímetro, lo primero que se debe hacer es tomar una muestra de 10 ml con la ayuda de una pro-pipeta electrónica y colocar el líquido en el viscosímetro capilar cannon-fenske (Figura 4.3.a).



Figura 4.3: (a) Viscosímetro capilar cannon-fenske.  
(b) Soporte del viscosímetro.

Después de colocar el líquido en el viscosímetro, éste se conecta en un soporte (Figura 4.3.b). En el soporte se encuentran ubicados dos sensores los cuales se debe tener cuidado, dado que tienen que estar alineados con las marcas anulares del capilar (inferior y superior), estos sensores funcionan de manera óptica-electrónica, dado que los meniscos con fibras de vidrio muy sensibles a la luz. Posteriormente se debe elegir si la medición la haremos por presión o por succión, en este caso se realizaron pruebas de presión. El software winvisco pide ingresar la densidad del fluido que se encuentra dentro del capilar para luego calibrar el viscosímetro mediante presión fuera del baño (Figura 4.4), hay ciertos aspectos que hay que tomar en cuenta como el número de viscopump que se ocupa y que numero de viscosímetro usar.



Figura 4.4: Baño de medición viscosidad.

Antes de ingresar el soporte con el viscosímetro previamente calibrado se debe acondicionar el baño, es decir fijar un rango de temperatura para poder trabajar que en este caso se trabajó entre 17°C como temperatura mínima y como temperatura máxima 23°C, además se debe fijar el nivel del baño, puesto que al estar expuesto el agua que se encuentra dentro con el tiempo se va evaporando. Seguidamente se dispone a comenzar la medición que dura aproximadamente 10 minutos para luego entrega la información. Luego de realizar la primera medición se debe lavar cuidadosamente el capilar, primero con agua para evitar residuos

sólidos dentro de este y luego se enrasa con alcohol para disponer seguidamente del secado con aire. Es importante que el capilar se encuentre en condiciones óptimas para caracterizar de forma representativa.

#### **d) Determinación de turbidez de agua clara**

Para la determinación de la turbidez de la fase clara se utilizó un equipo llamado turbidímetro (Figura 4.5.b), el cual consiste en pasar un haz de luz por medio de un frasco que contiene el fluido a medir (Figura 4.5.a) y medir las partículas chocan con la luz propinada por el equipo. Se debe tener cuidado con la limpieza del frasco que se ocupa, puesto que podría interferir con la medición, es necesario cebar secar y limpiar el frasco para iniciar la medición.

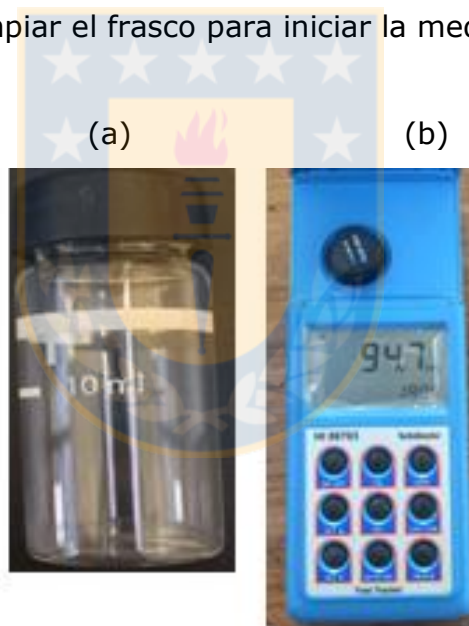


Figura 4.5: (a) Frasco que ingresa al turbidímetro.  
(b) Turbidímetro con frasco de calibración.

Se toman 10 ml de muestra líquida y se agrega al frasco limpio, luego de esto se agita el frasco con fluido y se inserta en el turbidímetro (Figura 4.5.b) posteriormente se cierra la tapa para así iniciar la medición. La unidad de medida de la turbidez es el NTU y es lo que arroja el equipo.

### e) **Determinación de pH de agua clara**

Para la determinación del pH de la fase clara se utilizó un pH-metro de laboratorio el cual fue necesario calibrar con buffers 4 y 7 antes de comenzar la medición, luego de esto se tiene la muestra en un vaso precipitado y se comienza a medir el teniendo cuidado de no golpear el electrodo que mide el pH, se espera que la medida que marca en la pantalla se estabilice y esa es la medición que sirve. Se debe evitar que el electrodo se encuentre seco, se lava con agua para evitar que el electrodo contenga residuos sólidos y luego de esto se realiza la siguiente medición.

### 4.2.2 **Pruebas en bandeja**

#### a) **Aspectos técnicos**

El experimento consiste en escurrir una pulpa (previamente preparada) por una bandeja de 950 mm de largo y 580 mm de ancho (Figura 4.6), dicha bandeja está hecha de un material de acrílico y se encuentra conectada a equipo el cual hace variar el ángulo de inclinación de la bandeja, a su vez por los costados de esta se encuentran unos sujetadores para ayudar a que la bandeja no se encuentre desnivelada, ya que el soporte donde se sitúa pasa justo por al medio y esto hace que se desnivele fácilmente.

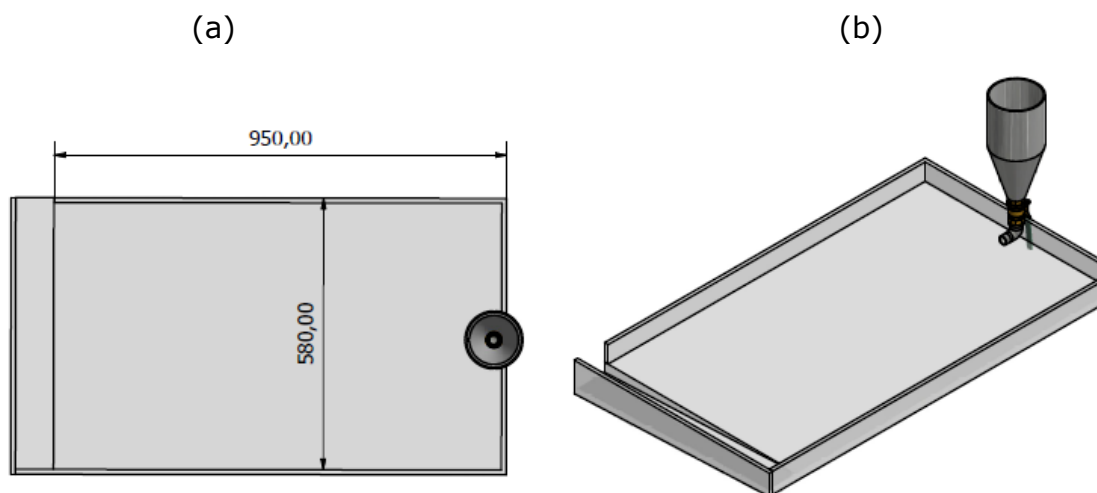


Figura 4.6: (a) Vista frontal de la bandeja con sus respectivas dimensiones  
(b) Vista lateral de la bandeja donde se aprecia el alimentador cónico.

En la parte más alta de la bandeja (en inclinación) está conectada un alimentador cónico (Figura 4.7) que tiene como dimensiones 130 [mm] ángulo máximo y 39 [mm] ángulo mínimo del cono, la altura cónica es de 134 [mm]. Este alimentador se encuentra conectado a un codo para evitar el aumento de la energía con la que sale la pulpa del mezclador y este a su vez le corta el paso a la pulpa con una válvula de globo hecha de acero.

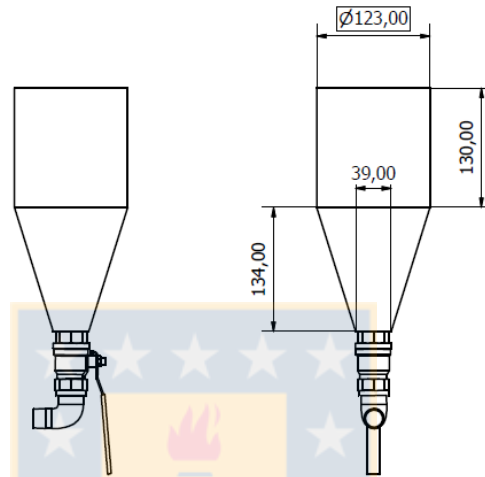


Figura 4.7: Alimentador cónico con dimensiones [mm].

Arriba del alimentador se ubica un mezclador que está conectado a un motor, que hace girar de acuerdo a las revoluciones que se estimen conveniente para mantener homogénea la pulpa y evitar que esta sedimente dentro del alimentador.

#### **b) Pruebas esferas Ballotini**

En las pruebas con esferas Ballotini se usó un kilo de material bi-disperso en mezclas que variaban en 5%, 50% y 95% de material con distribuciones granulométricas de 1180 , 600 y 300 [um].

La mezcla a analizar se pesa y se forma una pulpa de 65% en sólidos, la cual se acondiciona en el alimentador y se mantiene el giro del mezclador constante por al menos 2 minutos, cabe destacar que todo el experimento se graba con el fin de caracterizar el escurrimiento de la pulpa a través de la bandeja. Pasado los 2 minutos de homogeneización de la pulpa se abre la válvula para que salga el



material, luego de esto se espera hasta que la pulpa deje de escurrir, en la salida se encuentra una bandeja que recupera todo el material utilizado.

Se puede ver muy notoriamente que se forma una capa simétrica en la bandeja (Figura 4.8) en la cual se extraen muestras en distintas coordenadas. Estas muestras que se pesan antes y después de secarlas para extraer información como densidad, porcentaje en sólidos y luego tamizar cada muestra para ver cuál era la distribución granulométrica en cada coordenada, las muestras son de aproximadamente de no más de 18 [g].



Figura 4.8: Capa simétrica formada en la bandeja.

Se ocuparon tamices ASTM de malla #40, #70, #100, #140 y #200 con el correspondiente diámetro de partícula como se muestra en la tabla 1, la utilización de combinaciones de estos tamices se hace según el tipo de mezclas, para mezclas con distribuciones de 300 [um] era necesario emplear al menos 5 tamices, puesto que este caso fue el material más fino que se utilizó. Se observa en la presente tabla el diámetro de partícula de cada uno de los tamices.

Tabla 1: Diámetro de partícula tamices.

ASTM	dp[um]
40	420
70	210
140	105
100	149
200	74

Ahora con esta información se encuentran los parámetros de la ecuación de Rosin-Rammler, cabe destacar dicha ecuación se utiliza para la describir la distribución de tamaño de partícula.

$$F = \left( 1 - e^{-\left(\frac{d_p}{\lambda}\right)^m} \right) \quad (4.1)$$

Donde lambda es un factor que tiene dependencia del diámetro de partícula y m es una medida de extensión del tamaño de partículas. Se agrega un factor de corrección K fijo a la ecuación de rosin-rammler. Esto marca la distribución acumulada de partículas. Luego con la ayuda de solver se modifican los parámetros para que la diferencia entre los errores teóricos y reales lo más cercano a cero posible, es decir minimizar el error geométrico.

### c) **Pruebas con relave**

Se realizaron las pruebas con un kilo de relave, con el cual se forma una pulpa con 52% y 60% en sólidos, dicha pulpa se acondiciona en el alimentador, donde es preparada con el mezclador girando por aproximadamente 2 minutos, pasados los 2 minutos de homogeneización de la pulpa se dispone a abrir la válvula observando cómo se forma la capa simétrica en la bandeja. El experimento es grabado en todo momento desde que comienza a escurrir la pulpa por la bandeja con el fin de obtener el perfil de escurrimiento de pulpa.



Figura 4.9: Capa de relave en bandeja.

Posteriormente de la realización de la prueba se puede ver que parte de la pulpa va hacia la descarga, la cual se recupera con agua medida de 350 ml, esto es para verificar con cuanta cantidad sale la pulpa, y cuanto es la proporción que queda realmente en la bandeja. Se comprueba con un balance de masa que involucra la masa que va a la descarga más la masa que queda en la capa (Figura 4.9), se dispone a limpiar para luego recuperar por la salida de la bandeja, por ultimo hay masa que queda en el mezclador que también se verifica cuanto es la cantidad de masa que no se encuentra en la medición. Estas tres mediciones gobiernan el balance de masa total del experimento.

El procesamiento de los videos se realiza primero con la descomposición del video, es decir el video se pasa a fotogramas, se utilizó el programa FREE VIDEO TO JPG CONVERTER

Se puede ver que los videos están grabados con la bandeja inclinada así que es necesario transformar esta información para que la bandeja se vea de forma plana o sea sin peralte, de esta forma se ve como la pulpa escurre a medida que pasa el tiempo y como se distribuye en sus coordenadas. Seguidamente se ingresa Matlab, lo que básicamente hace es ingresar las dimensiones de la bandeja para luego ubicar la posición de los pixeles de la fotografía ingresada, el programa posiciona la fotografía de forma plana, como si se estuviese viendo desde arriba sin

ningún ángulo de inclinación, el programa arroja un gráfico de perfil de escurrimiento de pulpa a través de las coordenadas de la bandeja.

**d) Extrapolación de perfil de escurrimiento.**

Se procede a tomar puntos a distintas distancias en la dirección X y en la dirección Y (mm), conforme pasa el tiempo se obtienen coordenadas nuevas a medida que la pulpa comienza a escurrir y a formar la capa. Se ajusta la posición en x (horizontal) e y (vertical) al siguiente modelo mediante herramientas computacionales, buscando los parámetros  $K$  y  $\tau$  respectivamente.

$$y(t) = K_y * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_y}}\right) \quad (4.2)$$

$$x(t) = K_x * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_x}}\right) \quad (4.3)$$

La capa se comporta de manera simétrica (Figura 4.10), aun así en la toma de puntos horizontales se midió tanto el lado izquierdo (-X) como derecho (X) para posteriormente obtener una media de ambos puntos tomados.

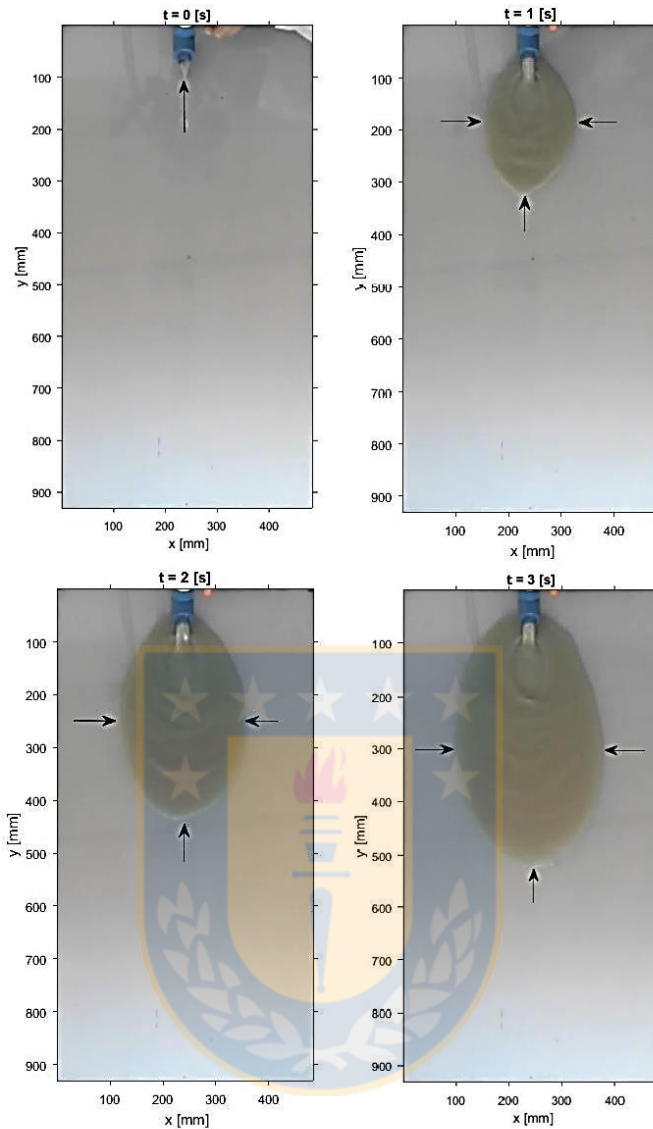


Figura 4.10: Puntos  $x(t)$  e  $y(t)$  a tomar dependiendo del tiempo de escurrimiento de pulpa.

- Obtención de los parámetros  $K_y, K_x, \tau_y$  y  $\tau_x$  :

En el caso de los parámetros  $K$ , Ambos parámetros  $K_y$  y  $K_x$  , representan el valor de largo y ancho respectivamente que alcanzan en estado estacionario, en el caso de este experimento se tenía que la pulpa en cuestión sobrepasaba el largo de la bandeja es por eso que a partir de los puntos que se tomaban, como se indicó anteriormente se predice el estado estacionario mediante la ayuda del modelo y la

herramienta SOLVER encontramos los parámetros, lo que hace es básicamente es modelar el instante donde la pulpa deja de escurrir.

En el caso de los parámetros  $\tau_y$  y  $\tau_x$  se hizo un análisis en las ecuaciones de  $Y(t)$  y  $X(t)$  haciendo  $t = \tau$ . De esta manera tenemos:

$$y(\tau) = K_y * (1 - e^{-1}) = 0.632 * K_y \tag{4.4}$$

$$x(\tau) = K_x * (1 - e^{-1}) = 0.632 * K_x \tag{4.5}$$

Por lo tanto el valor de  $\tau$ , queda representado para el tiempo cuando se alcanza el 63.2% de  $K_x$  y  $K_y$ .

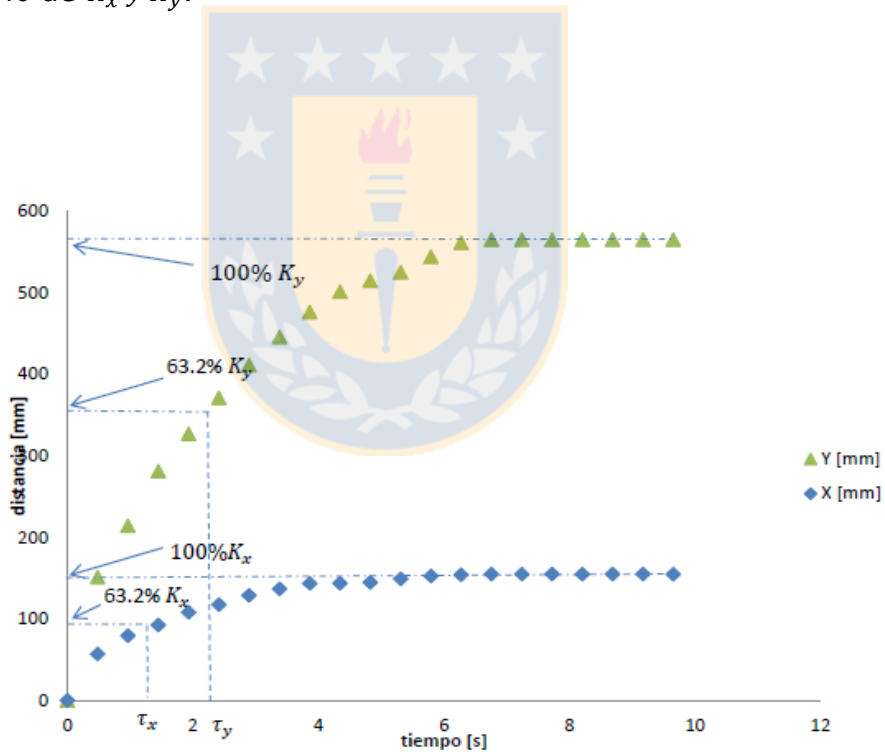


Figura 4.11: Perfil de avance de pulpa de una experiencia ejemplo.

- Razón A/L (ancho /largo)

Durante la formación de cada capa en el trabajo experimental se midió el máximo largo de capa y el máximo ancho. Generando así una razón Ancho/Largo para cada prueba .Se define la razón ancho/largo como:

$$\frac{A}{L} = \frac{K_x}{K_y}$$

## Coloración esferas Ballotini

El propósito de la coloración de las esferas Ballotini fue básicamente para observar de forma más significativa la estratificación de partículas según su distribución granulométrica y a la vez hacer un estudio estadístico mucho más minucioso como se puede observar en la Figura 4.12. Bajo la ayuda de un microscopio es posible lograr lo anterior mencionado, puesto que las partículas serían cuantificadas según la coordenada en que se tome la muestra.

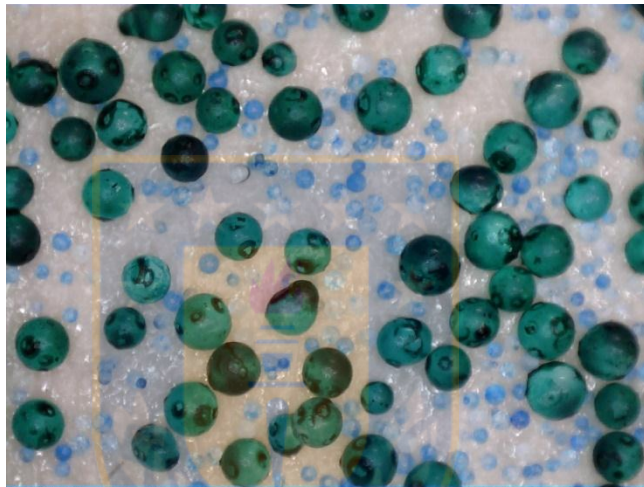


Figura 4.12: Imagen tomada por un microscopio de una prueba con esferas Ballotini con una mezcla 50% 1180 [um] y 50% 600 [um] en la coordenada (25,15).

Es importante decir que las esferas al estar hechas de vidrio se necesitó una tintura que no estuviera en base a agua, esto es necesario porque se hace una mezcla bi-dispersa de distintas distribuciones granulométricas y esta mezcla es acondicionada en el alimentador formando una pulpa con agua, es por eso que es de suma importancia evitar la pérdida de color del material, ya que esto causa un problema bastante grande a la hora de realizar el análisis de las muestras.

Se dispuso a la búsqueda de una tintura que sirviera, en ese caso fue una tinta china marca acrillex. también es importante destacar que para el material no todos los colores son los que tomaban bien, más bien colores como negro, verde y azul los otros colores como el amarillo y rojo no fueron tan eficientes como los anteriormente nombrados. Se debe tomar en cuenta que se coloraron esferas que tuvieran menos área superficial que las otras, es decir solo tinturamos esferas de

1180 (Figura 4.13) y 600 [um], puesto que las esferitas de 300 [um] necesitaban mucha más tinta para tener una coloración importante de dicho material y también se desteñían más fácilmente que las otras antes mencionadas, al ser mezclas bi-dispersas siempre se encuentran dos tipos de colores en el material preparado, ya que se incluía el color de las esferas de 300 [um] que vienen de fábrica.



Figura 4.13: Esferas de 1180 [um] antes de la coloración.

Lo primero que se debe hacer es pesar aproximadamente 1.5 [kg] de material y luego se aplica la tinta encima de las esferitas, utilizando guantes de latex distintos para cada color a utilizar se comienza el proceso de coloración, se debe mover las esferas e ir apretando unas contra otras hasta que se vea que todo el material de un color homogéneo, para la ayuda de esto se puede aplicar la técnica de amasar todo el material, se puede apreciar que el material se encuentra húmedo debido a la tinta que se encuentra en las paredes de las esferas es por eso que se dispone a secar en un horno para secar la tinta y que esta se incorpore en cada una de las esferas de forma más prolongada, se probaron distintas temperaturas de secado hasta que finalmente se llegó la temperatura optima que es de 80°C, posteriormente de sacar la bandeja con material seco este se debe preparar nuevamente. En la Figura 4.14 (a) se puede notar ciertas partes aglomeradas de material, por lo que es necesario rolear hasta que cada partícula se encuentre liberada y de cierta forma como al momento de iniciar el proceso. Es bastante complicado el roleo luego de la primera salida horno del material puesto que las



esferas se encuentran muy pegadas entre sí, así que es necesario rolear con cuidado y con un paño extra ubicarlo por encima del área en el que se dispone para rolear, evitando que las esferas salten y se pierda material. Posteriormente a la diferenciación de cada partícula teñida se vuelve a teñir al menos dos veces más.

(a)

(b)



Figura 4.14: (a) Bandeja con material luego del primer secado.  
(b) Esferas de 1180 [um] luego de lavado y secado.

Finalmente se pasa el material por un proceso de lavado con agua para desechar el exceso de tinta que hay en las esferitas, se debe lavar hasta que el agua sea lo más transparente posible, luego de esto se seca en el horno y el material sale sin aglomeraciones como se muestra en la Figura 4.14 (b), igual que en el inicio solo que ahora se encuentra de color.

Se puede apreciar fácilmente a la vista que el color en esferas de distribución 600 [um] en comparación a las de 1180 [um] toma un color más tenue en comparación a las esferitas de diámetro más grande (Figura 4.15) esto se debe al área superficial de ambas distribuciones, en caso de buscar que ambas se coloren de igual forma.

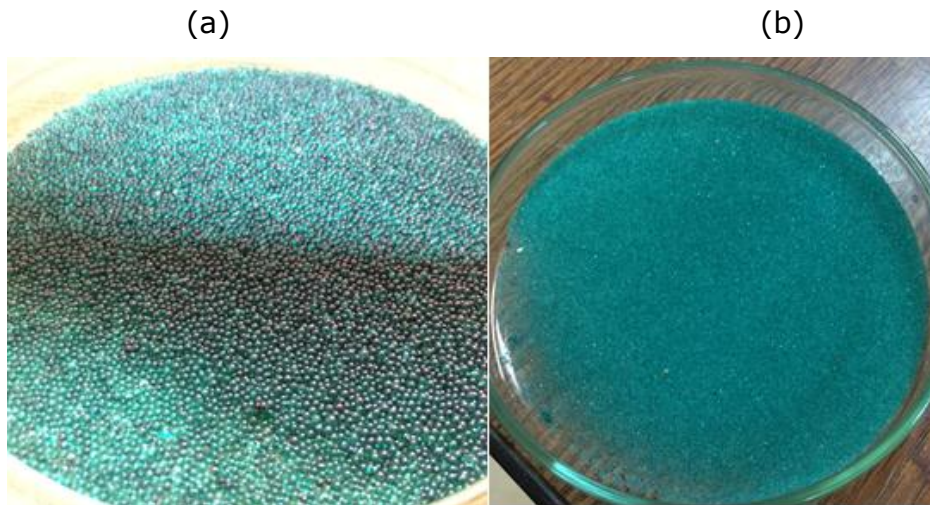


Figura 4.15: (a) Esferas de 1180 [um] color verde.  
(b) Esferas de 600 [um] color verde.



## 5. Resultados y discusiones

### 5.1 Caracterización de aguas claras:

Los resultados de la caracterización de aguas claras se presentan en el Anexo 6, se toman muestras de 100 ml que se preparan previamente en el sedirack a distintos porcentajes en sólidos. Donde los resultados se diferencian en relaves de dos tipos de origen, por ende dos composiciones mineralógicas distintas las cuales se trabajó a 52% y 60% en sólidos.

La estimación de la densidad se hizo mediante la ayuda de un picnómetro y el cálculo correspondiente se puede observar en el Anexo 1.

A partir de la información de densidades calculada se procede a medir la viscosidad, esto lo hacemos con la ayuda de un viscosímetro el cual nos arroja los valores de viscosidad dinámica de cada muestra preparada.

El pH es medido con un pH-metro el cual se espera a que se estabilice el valor que arroja el equipo. La turbidez se mide con un turbidímetro donde se toman 10 ml de cada muestra para que el equipo lea la muestra y arroje el valor dado.

### 5.2 Pruebas Reológicas.

Para conocer el comportamiento reológico de los relaves Los bronces y ODS analizamos muestras de 52% y 60% porcentaje en sólidos en un reómetro de cilindros concéntricos. Cabe destacar que los resultados entregados por el reómetro arrojaron parámetros que se ajustan al modelo de Bingham que se presenta a continuación.

$$\tau = \tau_0 + \mu_{\infty} \dot{\gamma}$$

Los parámetros que se ajustan en el modelo de Bingham para relave proveniente de la minera Los Bronces para un 52% de porcentaje en sólidos.

Tabla 2: Parámetros reológicos relave Los Bronces con un 52% en sólidos.

<b>Medición 1</b>		<b>Medición 2</b>	
$\tau_0$	4	$\tau_0$	4
$\mu$	0,009	$\mu$	0,011
$R^2$	0,810	$R^2$	0,842
$R$	0,900	$R$	0,917

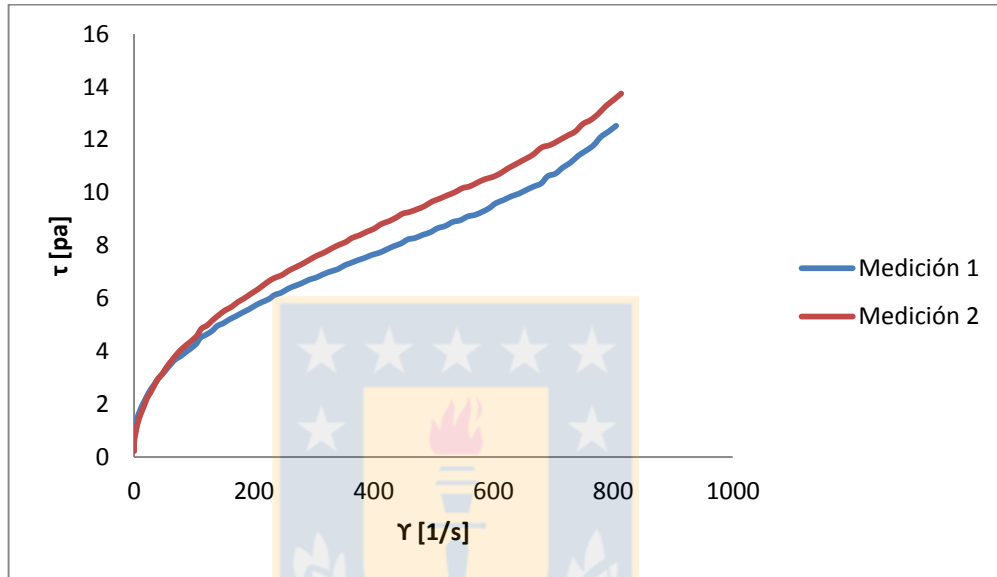


Figura 5.1: Curvas reológicas de relave los bronce con un 52% de porcentaje en sólidos.

Para el mismo relave pero con 60% de porcentaje en sólidos los parámetros son:

Tabla 3: Parámetros reológicos relave Los Bronces con un 60% en sólidos.

<b>Medición 1</b>		<b>Medición 2</b>	
$\tau_0$	10	$\tau_0$	10
$\mu$	0,026	$\mu$	0,022
$R^2$	0,90	$R^2$	0,85
$R$	0,95	$R$	0,92

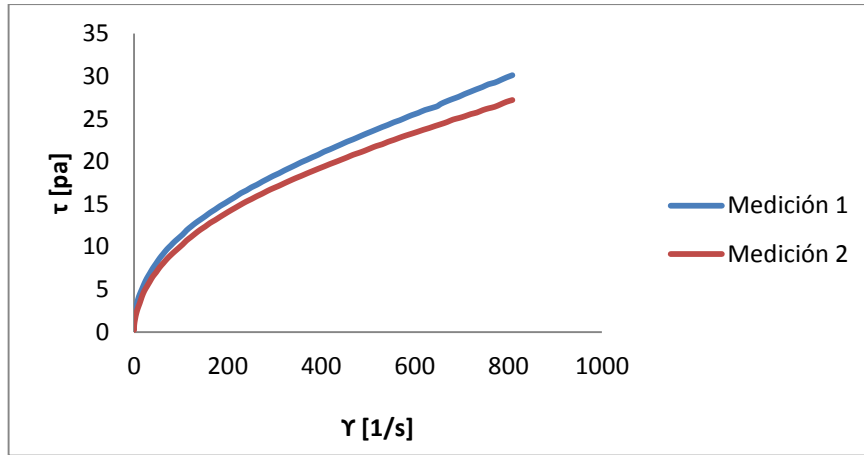


Figura 5.2: Curvas reológicas de relave Los Bronces con un 60% de porcentaje en sólidos.

Los parámetros que se ajustan en el modelo de Bingham para relave proveniente de la minera ODS para un 52% de porcentaje en sólidos son.

Tabla 4: Parámetros reológicos relave ODS con un 52% en sólidos.

<b>Medición 1</b>		<b>Medición 2</b>	
<b><math>\tau_0</math></b>	0,8	<b><math>\tau_0</math></b>	0,9
<b><math>\mu</math></b>	0,0043	<b><math>\mu</math></b>	0,0045
<b><math>R^2</math></b>	0,951	<b><math>R^2</math></b>	0,935
<b>R</b>	0,975	<b>R</b>	0,967

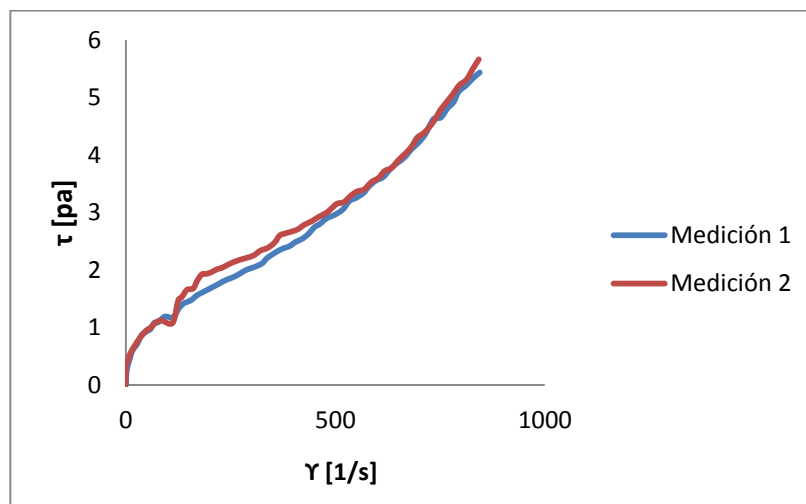


Figura 5.3: Curvas reológicas de relave ODS con un 52% de porcentaje en sólidos.

Para el mismo relave pero con 60% de porcentaje en sólidos los parámetros son:

Tabla 5: Parámetros reológicos relave ODS con un 60% en sólidos.

<b>Medición 1</b>		<b>Medición 2</b>	
<b><math>\tau_0</math></b>	0,9	<b><math>\tau_0</math></b>	0,5
<b><math>\mu</math></b>	0,0067	<b><math>\mu</math></b>	0,0055
<b><math>R^2</math></b>	0,978	<b><math>R^2</math></b>	0,977
<b>R</b>	0,989	<b>R</b>	0,988

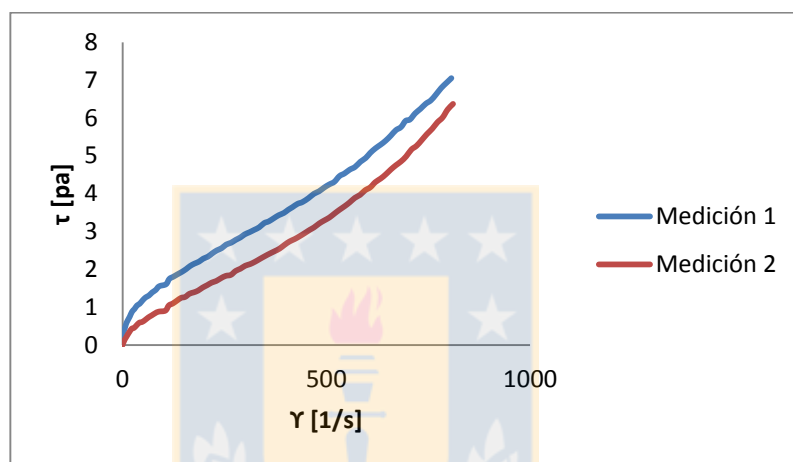


Figura 5.4: Curvas reológicas de relave ODS con un 60% de porcentaje en sólidos.

### 5.3 Pruebas en bandeja

A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron en el experimento con la bandeja a distintos materiales y variables de trabajo, además de presentar el perfil de velocidades que nos arrojó el procesamiento de imagen de los dos tipos de experimentos.

### 5.3.1 Pruebas con esferas Ballotini

En la Tabla 6 se muestra el diseño experimental que se utilizó en las pruebas con mezclas bi-dispersas de esferas Ballotini.

Tabla 6: Experimentos realizados con mezcla bi-dispersa.

N° de experimento	%sólidos	ángulo de inclinación	Mezcla bi-dispersa			
			5%	50%	50%	95%
1	65%	5°	-	600 (um)	1180 (um)	-
2	65%	5°	-	600 (um)	1180 (um)	-
3	65%	5°	300 (um)	-	-	1180 (um)
4	65%	5°	300 (um)	-	-	1180 (um)
5	65%	5°	-	300 (um)	1180 (um)	-
6	65%	5°	-	300 (um)	1180 (um)	-
7	65%	5°	1180 (um)	-	-	600 (um)
8	65%	5°	1180 (um)	-	-	600 (um)
9	65%	5°	1180 (um)	-	-	300 (um)
10	65%	5°	1180 (um)	-	-	300 (um)
11	65%	5°	600 (um)	-	-	1180 (um)
12	65%	5°	600 (um)	-	-	1180 (um)
13	65%	5°	-	300 (um)	600 (um)	-
14	65%	5°	-	300 (um)	600 (um)	-
15	65%	5°	600 (um)	-	-	300 (um)
16	65%	5°	600 (um)	-	-	300 (um)
17	65%	5°	300 (um)	-	-	600 (um)
18	65%	5°	300 (um)	-	-	600 (um)

Se realizó el experimento y toma muestras en cada coordenada como se puede ver en la Figura 5.5:



Figura 5.5: Toma de muestras por coordenadas

A partir de datos que fueron tomados en laboratorio se puede calcular la porosidad y posteriormente la densidad aparente por coordenada con la siguiente ecuación:

$$\varphi = \frac{\left(\frac{m_s}{\rho_s}\right)}{\left(\frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_l}{\rho_l}\right)} \quad (5.1)$$

Y ahora que se tiene el valor de la porosidad a partir de lo anterior de la siguiente forma:

$$\varepsilon = 1 - \varphi \quad (5.1)$$

Para luego obtener la densidad aparente en cada una de las coordenadas donde se toman las muestras:

$$\rho_{ap} = \varphi \cdot \rho_s + \varepsilon \cdot \rho_l \quad (5.2)$$

Se obtiene los valores como lo muestra Tabla 7:

Tabla 7: Resultados de la porosidad y densidad aparente prueba n°1.  
**65% en sólido a 5° de inclinación**

N° de muestra	Coordenadas (cm)	% sólido	$\varphi$	$\varepsilon$	$\rho_{ap}$
muestra 1	(25;15)	82,52	0,66	0,34	1,95
muestra 2	(25;20)	82,98	0,67	0,33	1,96
muestra 3	(25;30)	84,19	0,69	0,31	1,99
muestra 4	(25;40)	83,54	0,68	0,32	1,97
muestra 5	(25;50)	83,45	0,67	0,33	1,97
muestra 6	(25;60)	84,10	0,68	0,32	1,99
muestra 7	(25;70)	83,69	0,68	0,32	1,98
muestra 8	(30;50)	81,04	0,64	0,36	1,92
muestra 9	(30;60)	81,88	0,65	0,35	1,94
muestra 10	(30;70)	82,70	0,66	0,34	1,95
muestra 11	(30;90)	79,66	0,62	0,38	1,89



Resultados de la relación entre la densidad aparente y la posición del lugar donde se toma la muestra en la bandeja.

Se puede observar cómo se comporta la densidad aparente dentro de las distintas coordenadas, los resultados a continuación muestran la bandeja desde una vista frontal donde se aprecia el valor de la densidad aparente en cada una de las posiciones donde se tomaron cada muestra, todo esto con una prueba en duplicado.

Prueba n° 1 y n° 2 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 50% de 1180 [um] y 50% de 600 [um] se tiene lo siguiente:

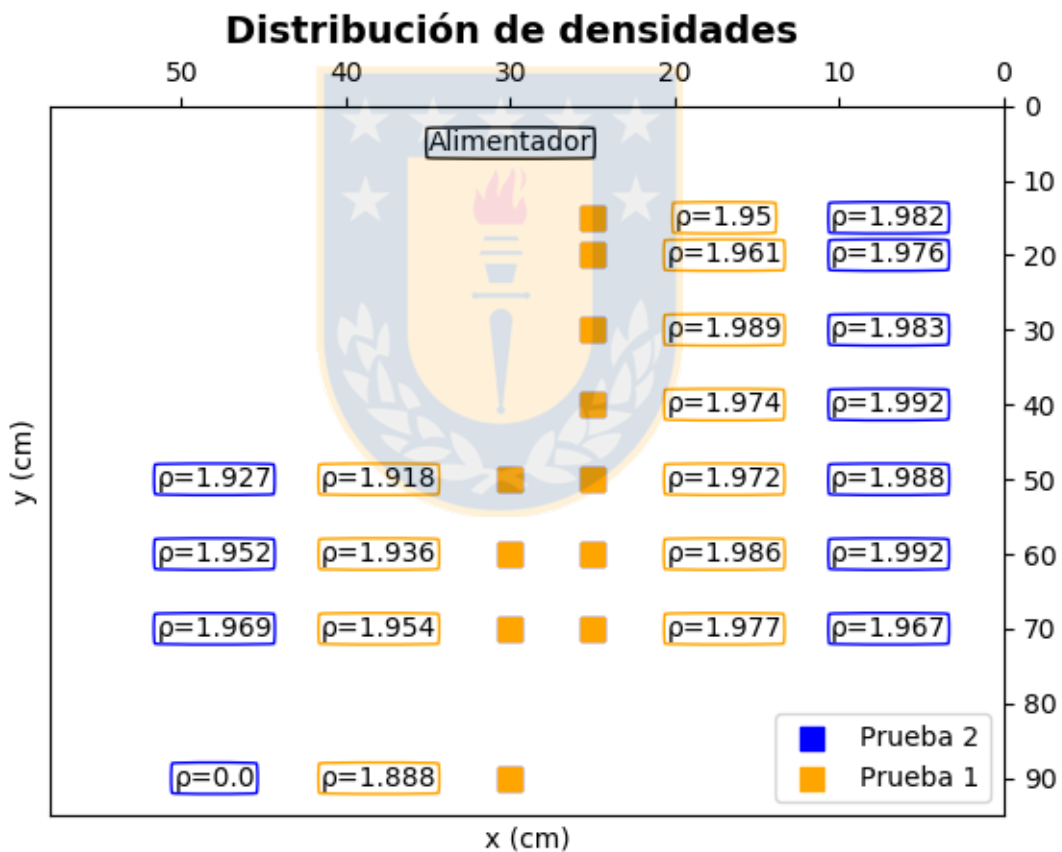


Figura 5.6 : Representación distribución de densidades prueba n° 1 y 2.

Se puede observar en la Figura 5.6 como la densidad va cambiando según la coordenada donde se toma la muestra, se estandariza una simetría de las

densidades a lo ancho de la capa con aumento de la densidad a medida que se llega al extremo de la bandeja, esto se puede deber a que al ser una mezcla 50/50 se logra una homogenización mayor en el alimentador y de una forma mucho más representativa, donde se tiene que el número de coordinación de las partículas se vuelve más semejante a lo largo de todo el material que escurre en la bandeja.

Prueba n°3 y n°4 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 95% de 1180 [um] y 5% de 300 [um] se tiene lo siguiente:

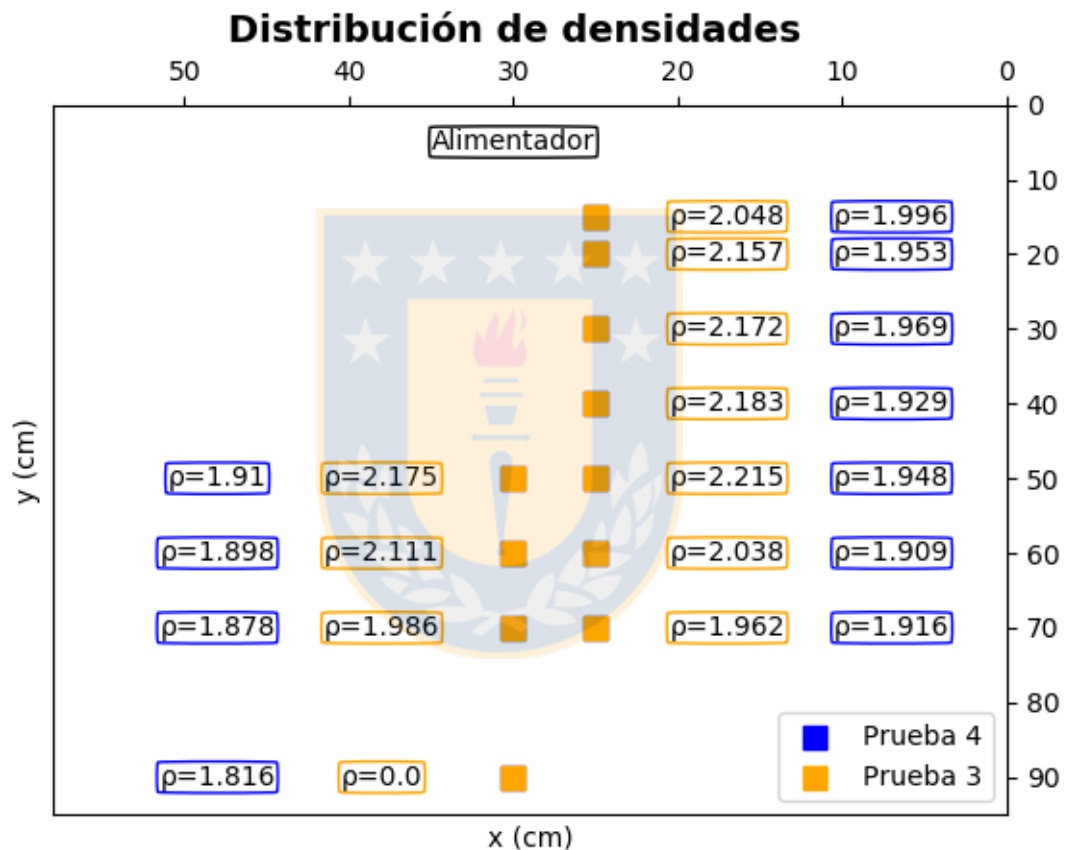


Figura 5.7: Representación distribución de densidades prueba n° 3 y 4.

Se puede observar en la Figura 5.7 que la densidad máxima de pulpa se encuentra en el centro de la capa, esto se debe a que las partículas de mayor diámetro se ubicaron en mayor proporción con las partículas finas, las cuales se ubicaron en cercanías a la boca del alimentador. En la Figura 5.7 se observa que la densidad máxima se encuentra en la boca del alimentador, se logra apreciar un

comportamiento más homogéneo en la distribución de la mezcla total, esto se debe a que las partículas finas se posicionaron de una forma más uniforme en toda la capa lo cual ocasiono un aumento del número de coordinación, la diferencia de los resultados para una prueba con las mismas condiciones iniciales, se debe a que la mezcla bi-dispersa es de un 95% de partículas mucho más gruesas y 5% de partículas cuya distribución granulométrica es mucho más pequeña, se puede ver claramente que la prueba en si no es representativa puesto que la homogenización de la pulpa no fue del todo eficaz.

Prueba n°5 y n°6 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 50% de 1180 [um] y 50% de 300 [um] se tiene lo siguiente:

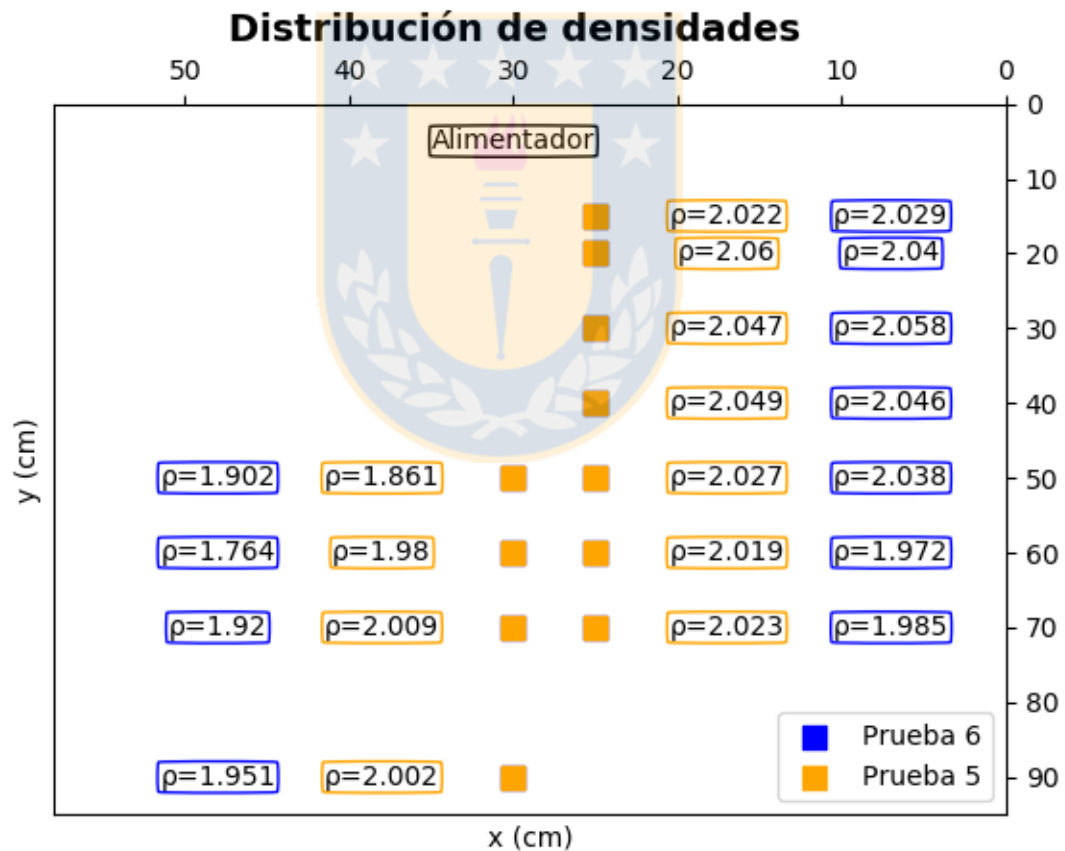


Figura 5.8: Representación distribución de densidades prueba n° 5 y 6.

En la Figura 5.8 se puede apreciar un comportamiento similar en ambas pruebas de condiciones iniciales iguales, la densidad varia muy poco a lo largo toda

la capa, la pulpa logra una homogenización importante debido a la naturaleza de la mezcla, al haber mayor cantidad de partículas finas que se posicionan a lo largo del lecho formado por las partículas gruesas, lo que también obedece al efecto de empaquetamiento mayor a medida que la diferencia entre los tamaños de partícula aumenten, y que además exista un incremento del número de partículas finas.

Prueba n°7 y n°8 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 95% de 600 [um] y 5% de 1180 [um] se tiene lo siguiente:

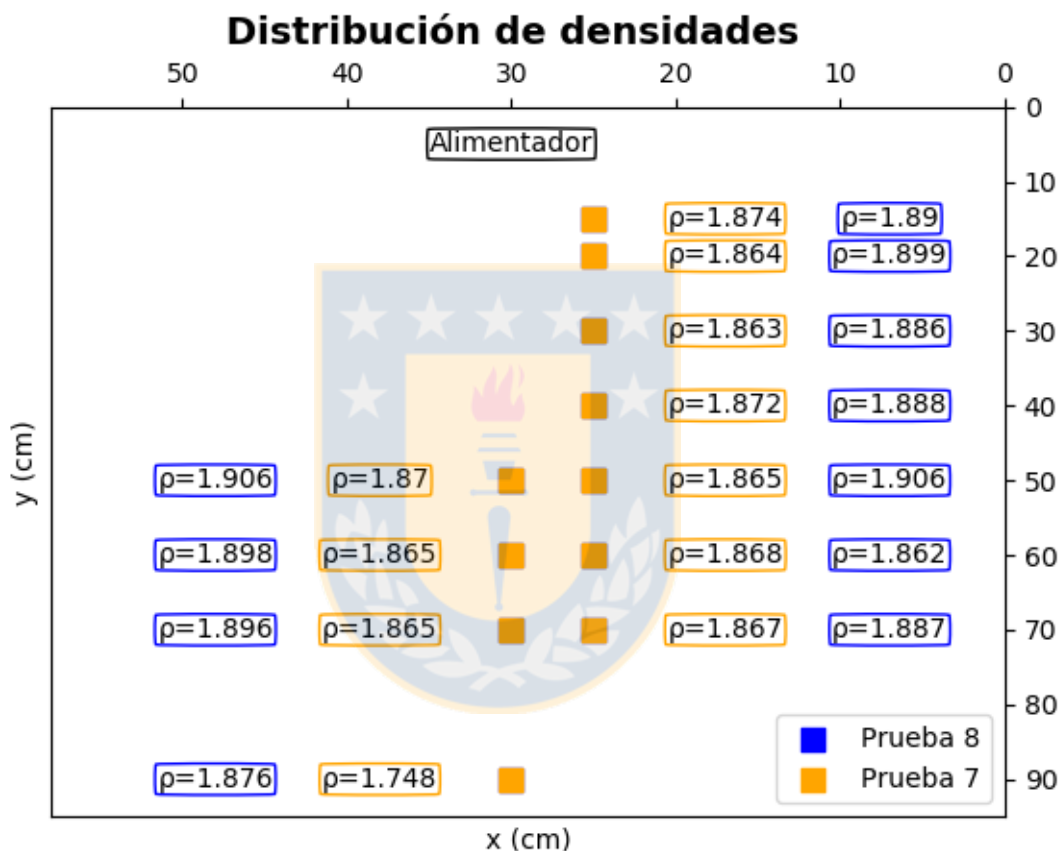


Figura 5.9: Representación distribución de densidades prueba n° 7 y 8.

En la Figura 5.9 se logra apreciar un comportamiento en cierta forma similar en ambas pruebas, la mezcla a pesar de no ser óptima en relación al número de partículas como también relación de tamaños, logra formar una pulpa homogénea en ambas pruebas, donde las partículas gruesas se ubican de forma proporcional en toda la capa. Dejando así que el lecho este formado por partículas finas que hace que el arrastre de las partículas más gruesas sea más indiferenciado.

Prueba n°9 y n°10 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 95% de 300 [um] y 5% de 1180 [um] se tiene lo siguiente:

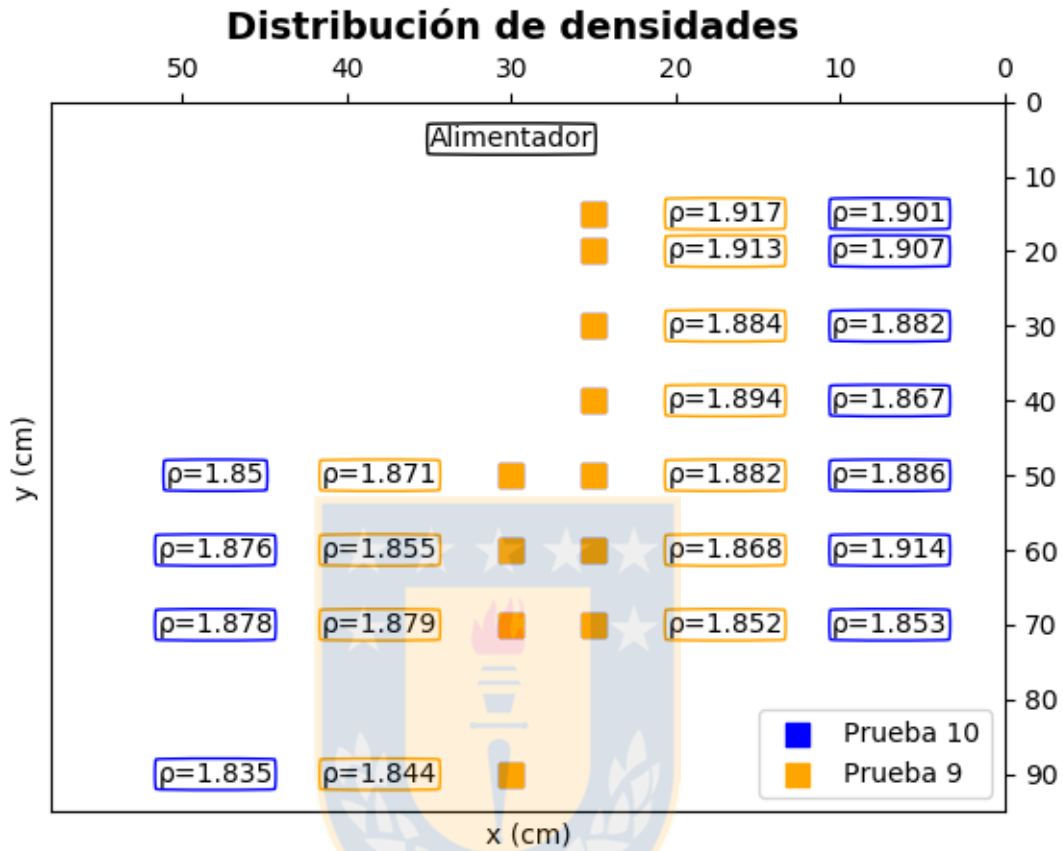


Figura 5.10: Representación distribución de densidades prueba n° 9 y 10.

En la Figura 5.10 se logra apreciar un comportamiento bastante similar en ambas pruebas, la mezcla a pesar de no ser optima en correspondencia al número de partículas pero si en términos de relación al tamaño de partículas, logra formar una pulpa representativa en ambas pruebas, donde las partículas gruesas se ubican de forma proporcional en toda la capa. Dejando así que el lecho este formado por partículas finas que hace que el arrastre de las partículas más gruesas sea más uniforme.

Prueba n°11 y n°12 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 95% de 1180 [um] y 5% de 600 [um] se tiene lo siguiente:

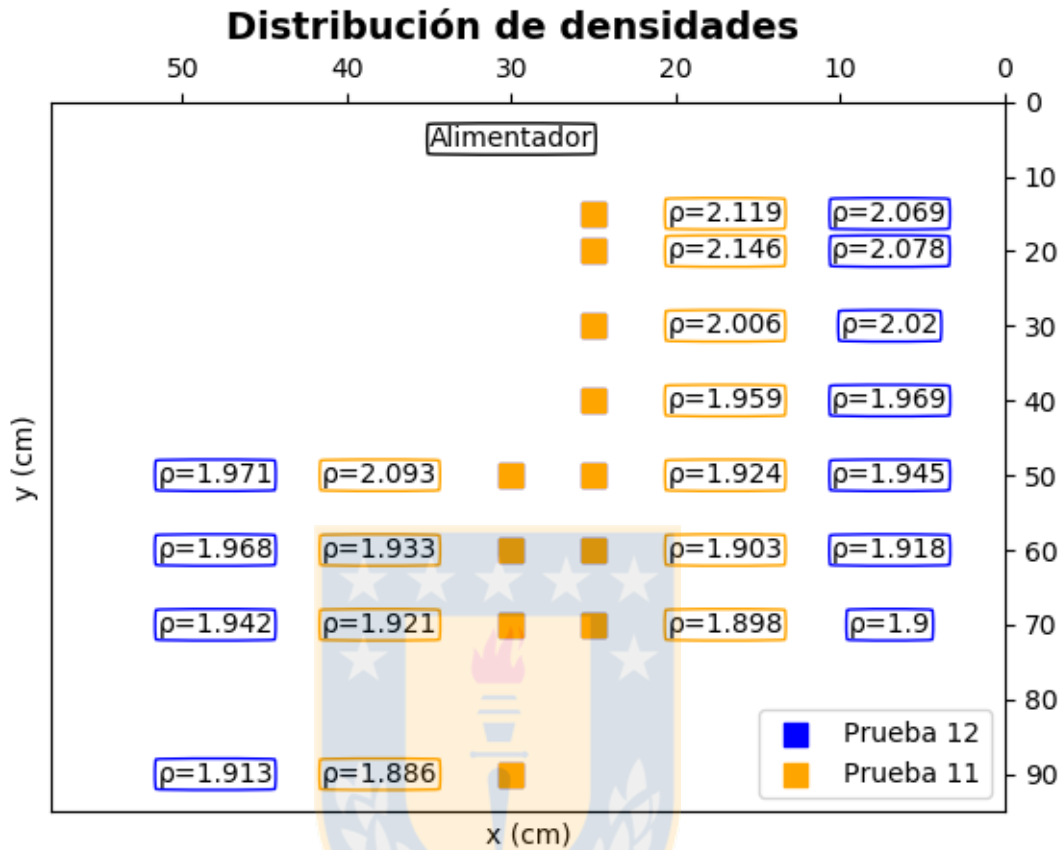


Figura 5.11: Representación distribución de densidades prueba n° 11 y 12.

En la Figura 5.11 se logra percibir que la densidad máxima se encuentra en la boca de la descarga, al notar que la mezcla que se encuentra en alimentador es mayormente conformado por partículas gruesas, esto ocasiona que hay mayor arrastre de las partículas finas que se posicionan uniformemente a lo largo de la capa, la diferencia que se nota en la prueba n° 11 es que existe un mayor arrastre por parte de las partículas gruesas a las partículas finas, lo cual tiene una significancia notable en el aumento de la densidad en la salida de la descarga, para así luego ir disminuyendo de una forma mucho más drástica, en la prueba n°12 se puede ver un comportamiento similar solo que la densidad comienza a disminuir de una forma mucho más paulatina.

Prueba n°13 y n°14 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 50% de 300 [um] y 50% de 600 [um] se tiene lo siguiente:

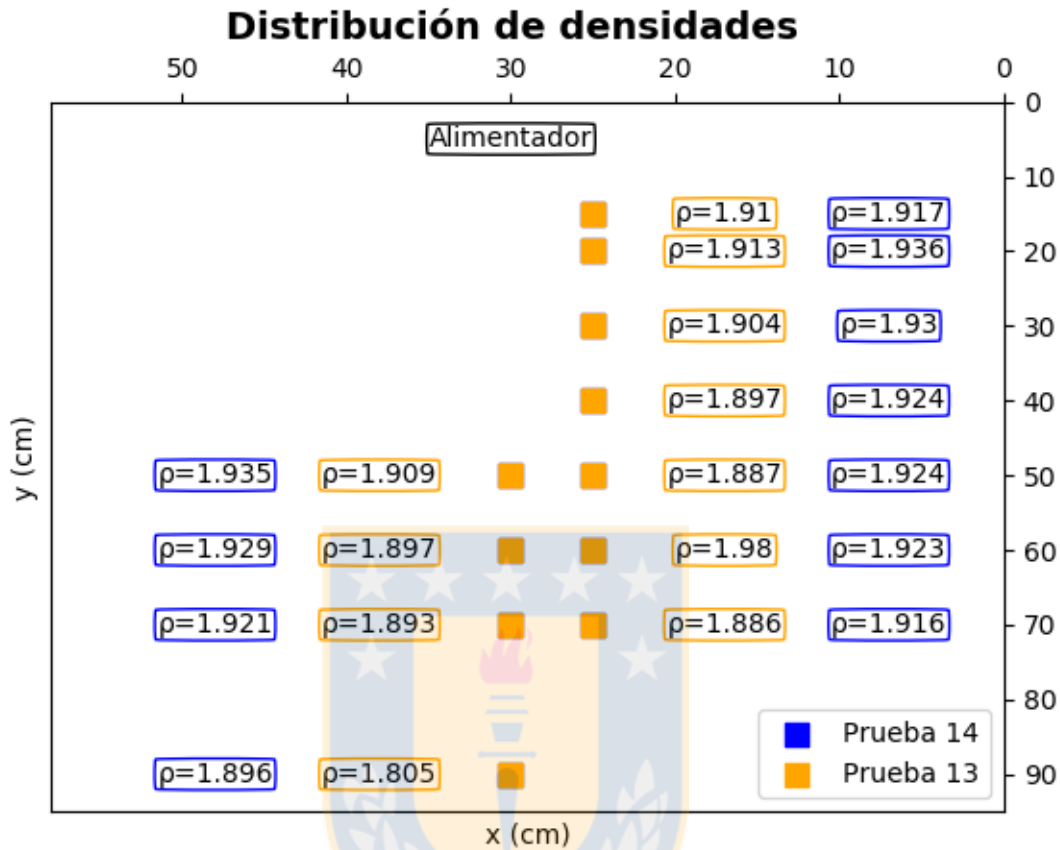


Figura 5.12: Representación distribución de densidades prueba n° 13 y 14.

El comportamiento de la Figura 5.12 si bien se puede apreciar una conducta relativamente parecida, en términos de valores que se obtuvieron al comienzo y al final de la capa. Cabe destacar un fenómeno en esta experiencia, que es significativamente similar a los resultados que se obtuvo en la prueba 7 y 8 (Figura 5.9), ambas experiencias forman mantos muy equivalentes, esto se debe a las condiciones iniciales de ambos ensayos, logran una mezcla bastante homogénea a pesar de ser muy diferentes si comparamos las dos experiencias.

Prueba n°15 y n°16 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 95% de 300 [um] y 5% de 600 [um] se tiene lo siguiente:

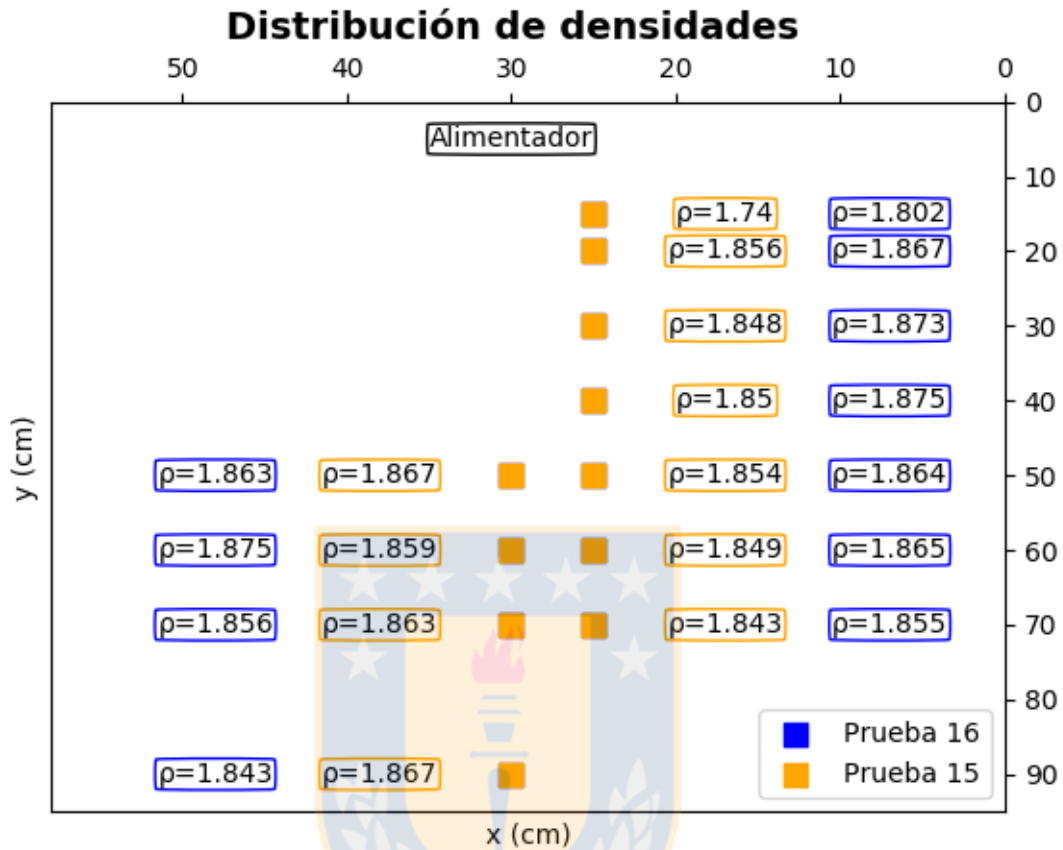


Figura 5.13: Representación distribución de densidades prueba n° 15 y 16.

En la Figura 5.13 se observa un comportamiento notablemente similar, donde la densidad mínima se ubica en la boca de la descarga, esto se debe a la naturaleza de la mezcla que está conformada por diferencias no tan sustanciales de distribución en el tamaño de las partículas, esto hace que la mezcla sea más homogénea y que la densidad vaya aumentando a medida que escurre la pulpa por la bandeja, al menos se aprecia notoriamente este aumento hacia el centro de la capa que se formó como se ven en ambas figuras.



Prueba n°17 y n°18 con condiciones para la mezcla bi-dispersa de un 95% de 600 [um] y 5% de 300 [um] se tiene lo siguiente:

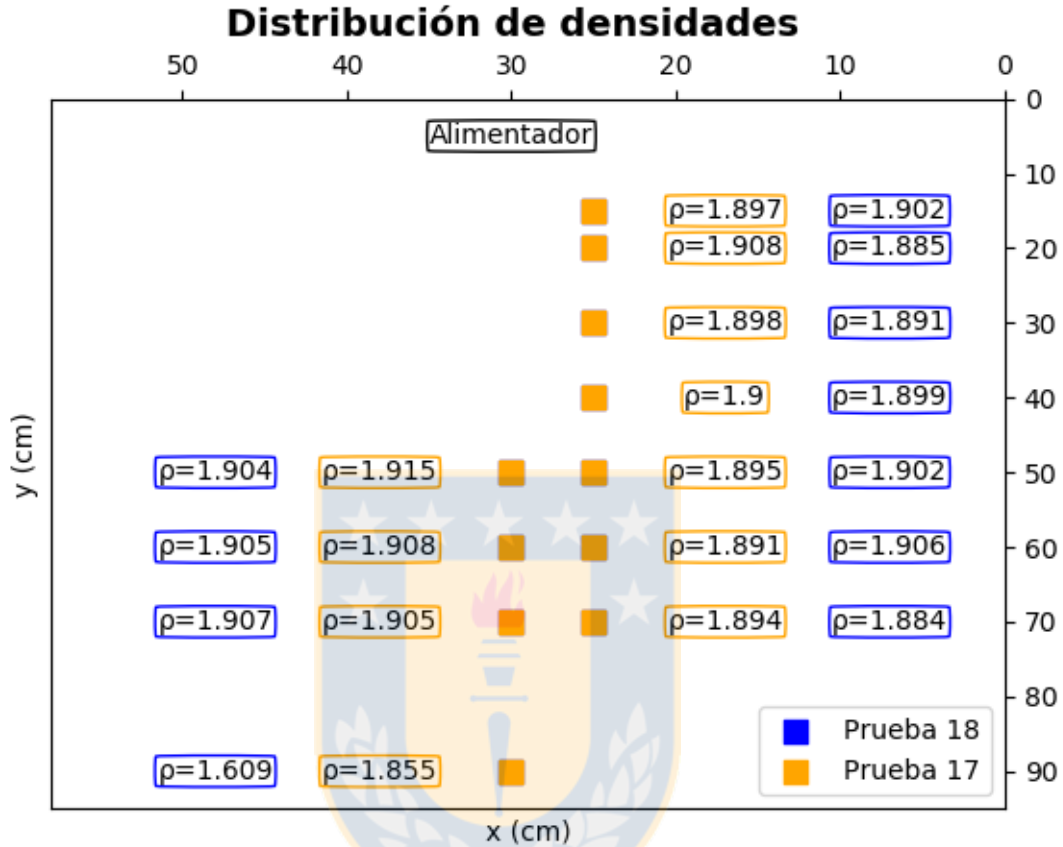


Figura 5.14: Representación distribución de densidades prueba n° 17 y 18.

En la Figura 5.14 se puede observar una clara disminución de la densidad en ambas pruebas, donde la densidad inicial, es decir en la entrada de la descarga es bastante similar, esto se debe a que la estratificación en dicha zona es análoga en ambas pruebas. La notoria diferencia en la forma del manto se debe a como se ubican las partículas gruesas a lo largo de toda la bandeja en la prueba 17 el número de esferitas fue disminuyendo paulatinamente en las coordenadas de donde se extrajeron las muestras, las esferas más gruesas forman un lecho donde los finos se ubican entre los intersticios de tal manera que la conducta de la densidad es proporcional a la estratificación de los gruesos. En la prueba n°18 se ve que el posicionamiento de los gruesos es mucho más uniforme en todas las

coordenadas es por eso que la variación de la densidad es mucho más pausada en toda la capa.

### 5.3.2 Pruebas con relave

Mediante el procesamiento de imagen se obtuvo el perfil de avance de pulpas de relave a 52% y 60% en sólidos, además de variar el ángulo de inclinación de la bandeja a 3°, 5° y 7° respectivamente.

#### a) Resultados grabación de pruebas.

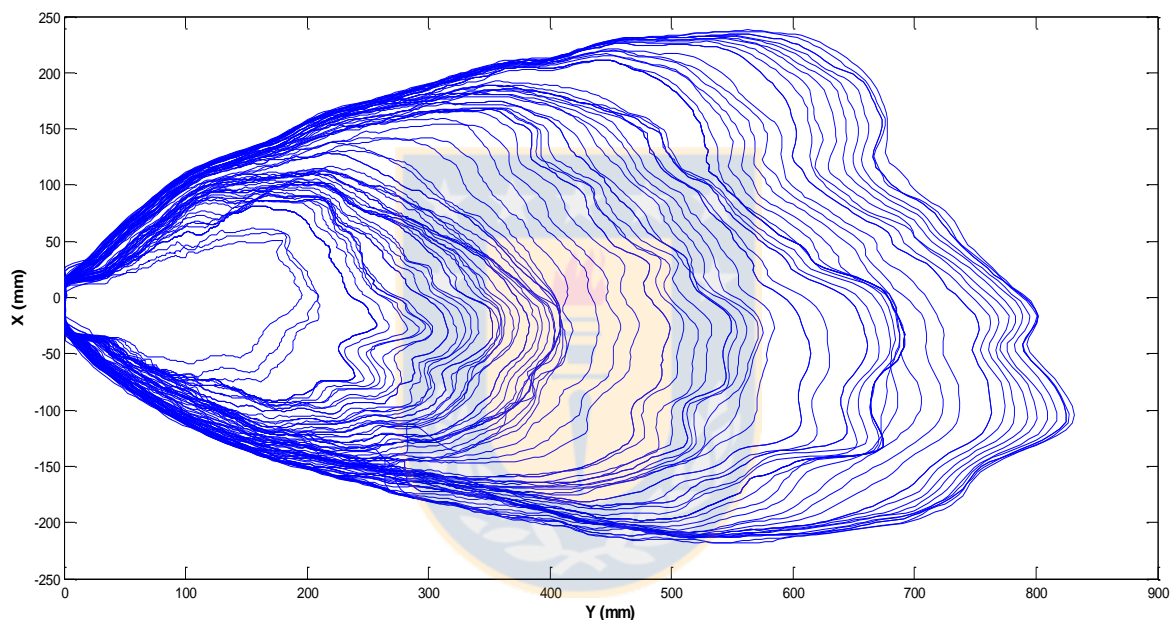


Figura 5.15: Perfiles de avance cada 0.033s de una pulpa de 52% en sólidos a 3° de inclinación.

En la Figura 5.15 se puede apreciar el perfil de avance a 3° de inclinación de una pulpa de relave a 52% en sólidos, cabe destacar que la mezcla al contener mayor cantidad de agua, esta escurre mucho más rápido por la bandeja, por ende en el momento de procesar el video se utilizó un mayor número de fotogramas por segundo que en pruebas con mayor cantidad de % en sólidos. Se puede apreciar una capa parcialmente simétrica a medida que avanza por la bandeja hasta deformarse en el centro esta.

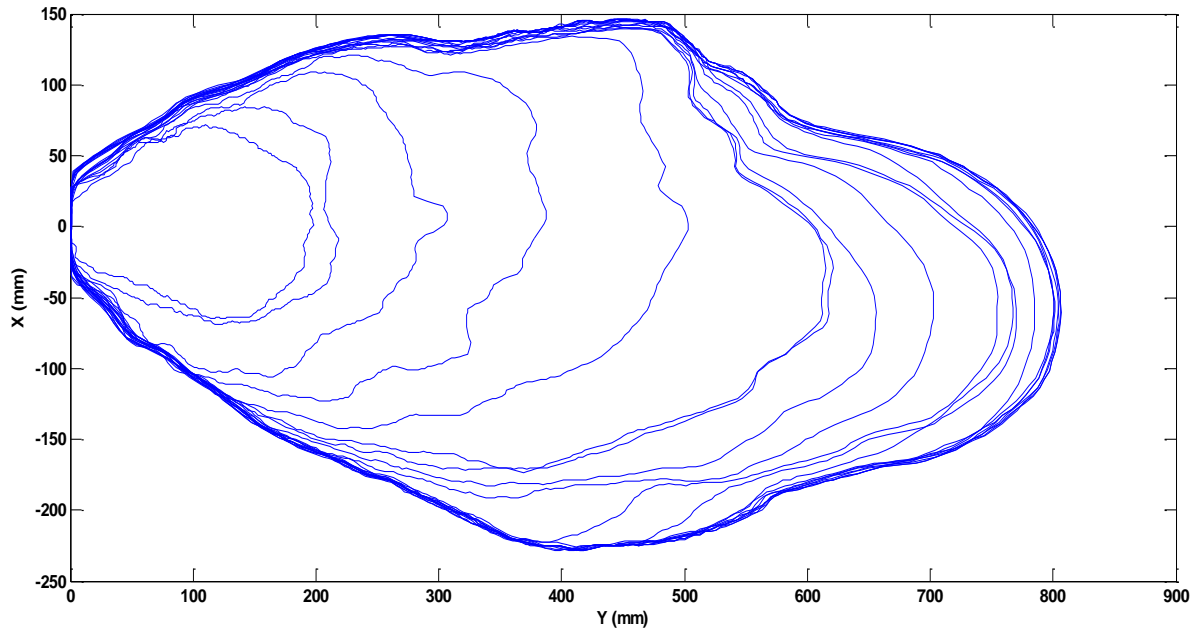


Figura 5.16: Perfiles de avance cada 0.33s de una pulpa de 60% en sólidos a 3° de inclinación.

Se puede ver en la Figura 5.16 el perfil de avance a 3° de inclinación de una pulpa de relave a 60% en sólidos. Se utilizó menos fotogramas por segundo para el procesamiento del video respectivo, puesto que no eran tan significativo el avance en el transcurso de la prueba en comparación a la prueba con el mismo ángulo de inclinación, pero con 52% en sólidos. La capa si bien no es tan simétrica si se puede apreciar un aumento lineal de la formación de las áreas, además de una estabilización marcada en el ancho y largo esta.

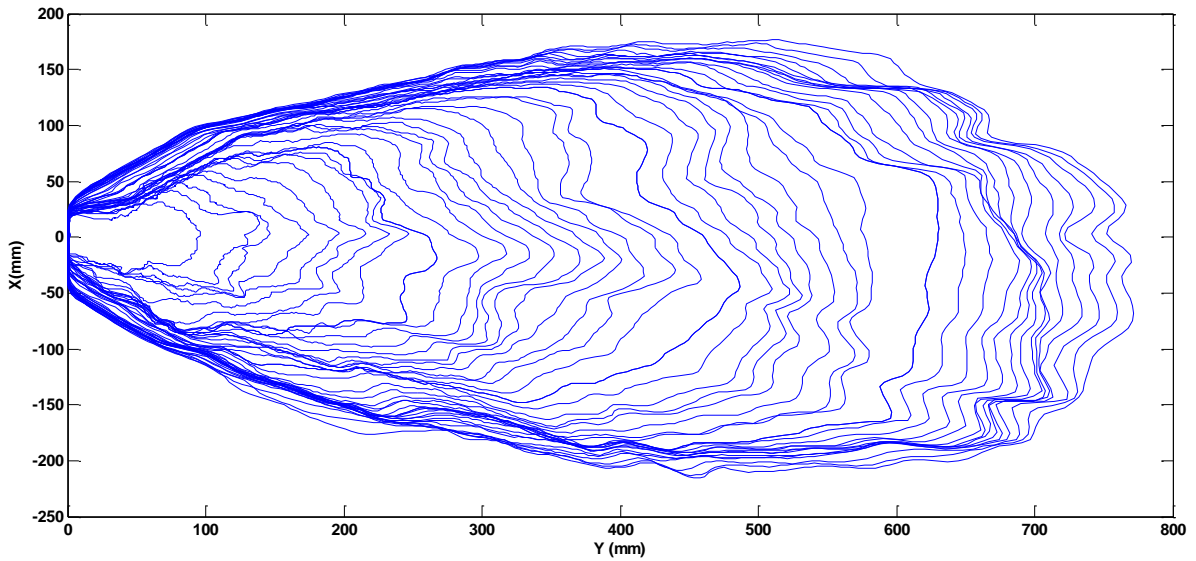


Figura 5.17: Perfiles de avance cada 0.033s de una pulpa de 52% en sólidos a 5° de inclinación.

En la Figura 5.17 muestra el perfil de avance a 5° de inclinación de una pulpa de relave a 52% en sólidos se aprecia un comportamiento simétrico de la pulpa donde la relación ancho largo crece de manera proporcional. La estabilización de la capa se efectúa a lo ancho, mientras que a lo largo se puede ver que el escurrimiento de la pulpa se vuelve menos estable, es decir la pulpa sigue avanzando de manera constante.

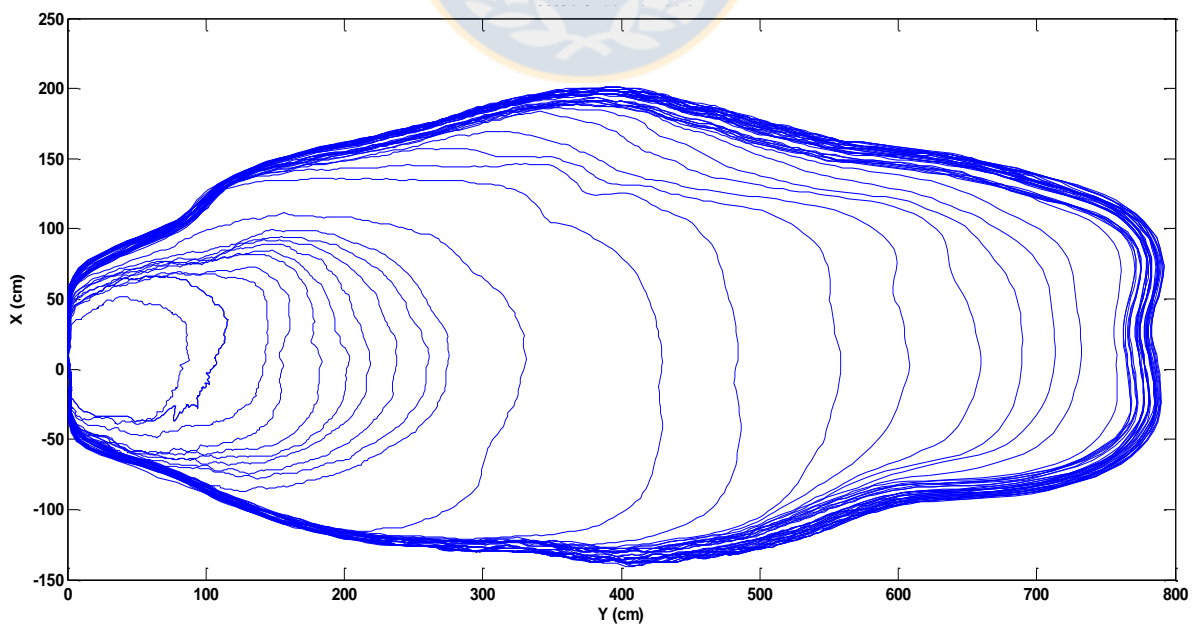


Figura 5.18: Perfiles de avance cada 0.33s de una pulpa de 60% en sólidos a 5° de inclinación.

En la Figura 5.18 al igual que en la experiencia con inclinación  $3^\circ$  se utilizó menos fotogramas por segundo para el procesamiento del video respectivo. Se puede ver que en punta de la bandeja se aprecia cómo se estabiliza la pulpa en ambos ejes.

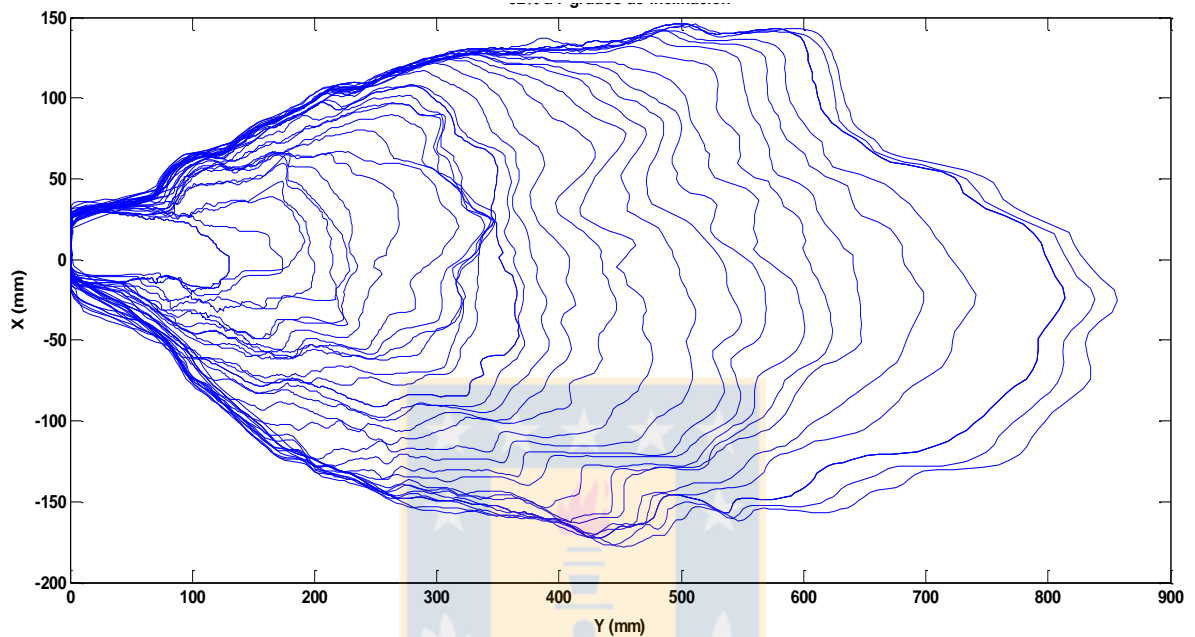


Figura 5.19: Perfiles de avance cada 0.033s de una pulpa de 52% en sólidos a  $7^\circ$  de inclinación.

En la Figura 5.19 muestra el perfil de avance a  $7^\circ$  de inclinación de una pulpa de relave a 52% en sólidos se aprecia un comportamiento ligeramente simétrico de la pulpa donde la relación ancho largo crece de manera proporcional. La poca suavidad de las curvas se debe a que el programa no logró procesar con éxito el perfil de avance de la pulpa a esto además se suma que la estabilización de la capa no se aprecia de una manera consistente.

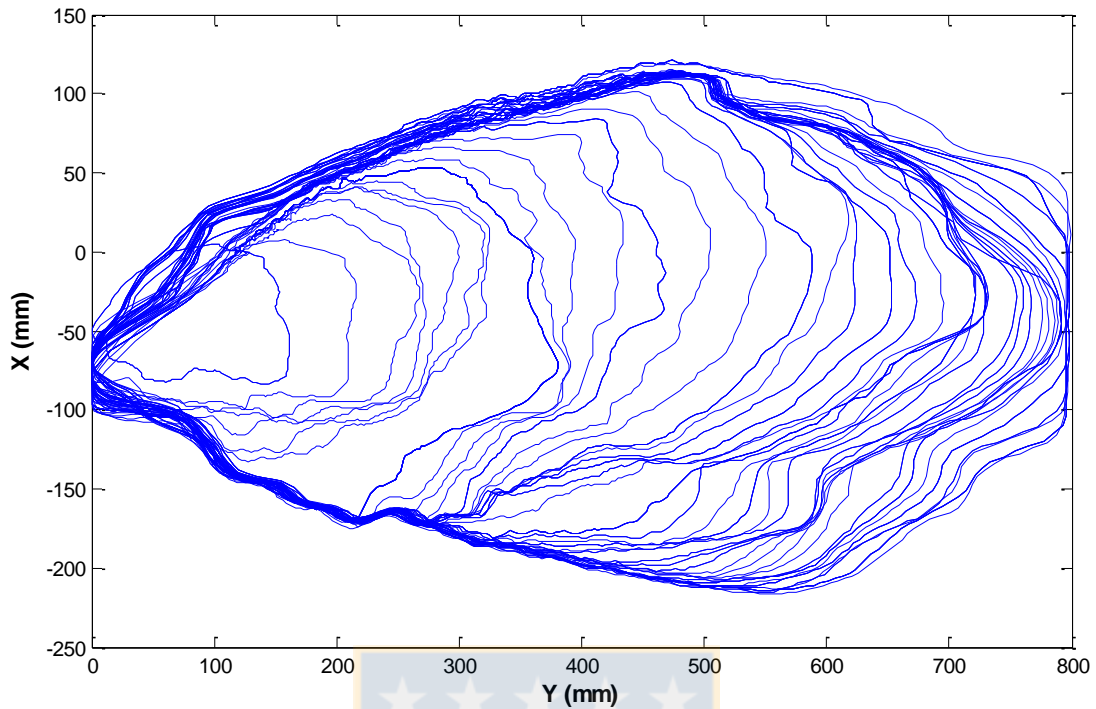


Figura 5.20: Perfiles de avance cada 0.033s de una pulpa de 60% en sólidos a 7° de inclinación.

En la Figura 5.20 muestra el perfil de avance a 7° de inclinación de una pulpa de relave a 60% en sólidos donde se utilizó menos fotogramas por segundo para el procesamiento del video respectivo, se observa una capa sin simetría lo cual es errado en comparación a la experiencia, ya que en rigor la capa contuvo simetría. La poca suavidad de las curvas se debe a que el programa no logró procesar con éxito el perfil de avance de la pulpa.

Mediante el procesamiento de imágenes se pudo obtener el área de cada capa en función el tiempo como se puede apreciar en la Figura 5.21:

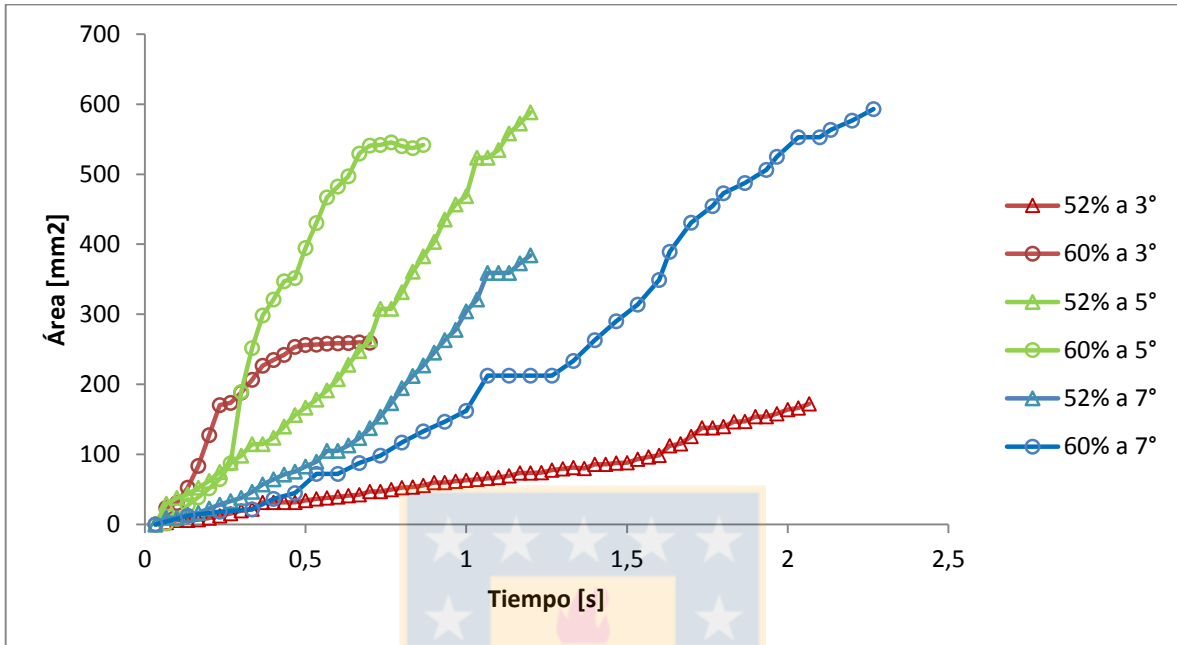


Figura 5.21: Grafico área de formación de capa v/s tiempo

Se puede apreciar en la Figura 5.21 un comportamiento lineal del área en función del tiempo cuando la capa se comienza a formar, las curvas obtenidas en los ángulos 3° y 5° se comportaron de una forma similar donde la pendiente de la curva de 52% en sólidos es mucho menos pronunciada, es decir el área a medida que pasa el tiempo aumenta de una forma más lenta y constante, la variación importante es en la estabilización del aumento de las áreas que son 2,06[s] y 1,2[s] respectivamente, mientras que la curva de 60% en sólidos tiene una pendiente más grande y crece de una manera más abrupta con una estabilización en 0,7[s] y 0,87[s] en sus respectivos ángulos. En el caso de ángulo 7° ocurre el fenómeno contrario, donde la curva de 52% en sólidos tiene una mayor pendiente y el área de la capa deja de crecer en 1,2[s], es decir sigue escurriendo pero sobre la capa que se forma en la bandeja, mientras que la curva de 60% en sólidos crece de una manera proporcional y se estabiliza en 2,26[s].

## b) Resultados extrapolación de perfil de escurrimiento

Mediante el procesamiento de imágenes se obtuvo la extrapolación de la distancia de pulpas de relave a 52% y 60% en sólidos, además de variar el ángulo de inclinación de la bandeja a 3°, 5° y 7° respectivamente.

b.1) Prueba con un 52% en sólidos a 3° de inclinación de la bandeja:

Tabla 8: Prueba de escurrimiento con relave a 52% en sólidos a 3° de inclinación.

52% a 3°			
Experiencia n°1		Experiencia n°2	
<b>k<sub>x</sub></b>	30.69	<b>k<sub>x</sub></b>	25.48
<b>τ<sub>x</sub></b>	2.06	<b>τ<sub>x</sub></b>	1.98
<b>k<sub>y</sub></b>	99.86	<b>k<sub>y</sub></b>	48.02
<b>τ<sub>y</sub></b>	4.10	<b>τ<sub>y</sub></b>	2.02
<b>A/L</b>	0.31	<b>A/L</b>	0.53

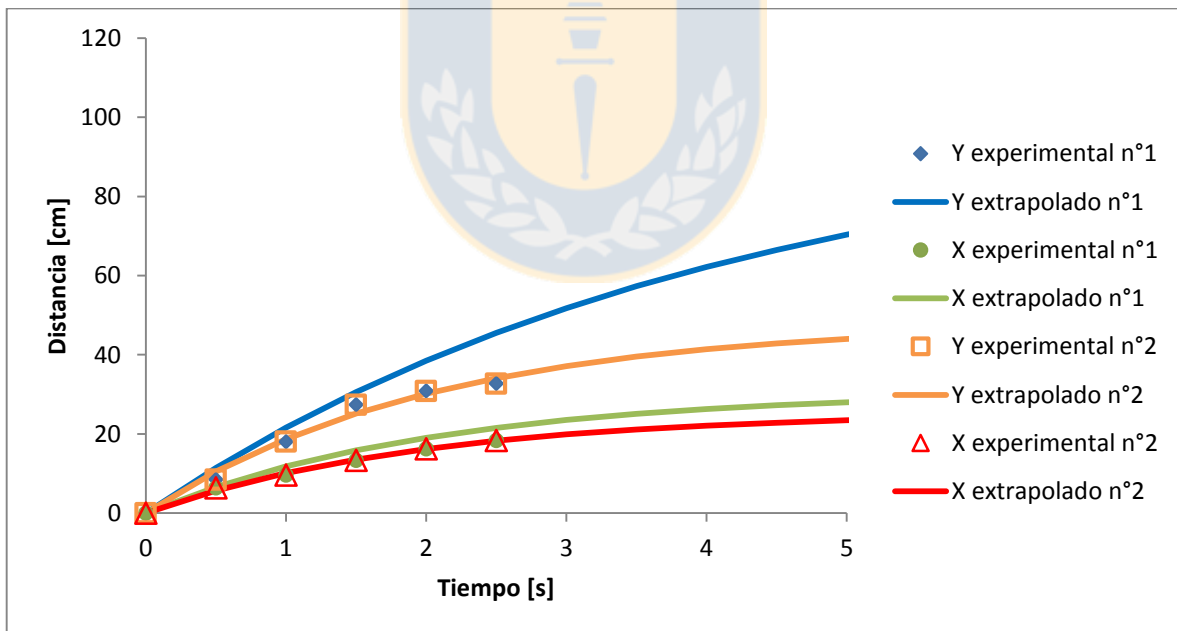


Figura 5.22: Perfil de avance de pulpa de 52% en sólidos dependiendo del tiempo con 3° de inclinación con duplicado.



En la Figura 5.22 se observa un ajuste similar en las dos pruebas realizadas La relación A/L se diferencia un 26,2% de la experiencia 1 y experiencia 2. Se aprecia además que el parámetro  $\tau_y$  se diferencia al doble del valor de la experiencia 2 lo mismo con los parámetros  $k_x$  y  $k_y$ .

b.2) Prueba con un 60% en sólidos a 3° de inclinación:

Tabla 9: Prueba de escurrimiento con relave a 60% en solidos a 3° de inclinación.

60% a 3°			
Experiencia n°1		Experiencia n°2	
$k_x$	25.333	$k_x$	25.175
$\tau_x$	0.919	$\tau_x$	0.553
$k_y$	97.405	$k_y$	77.286
$\tau_y$	1.790	$\tau_y$	1.131
A/L	0.26	A/L	0.33

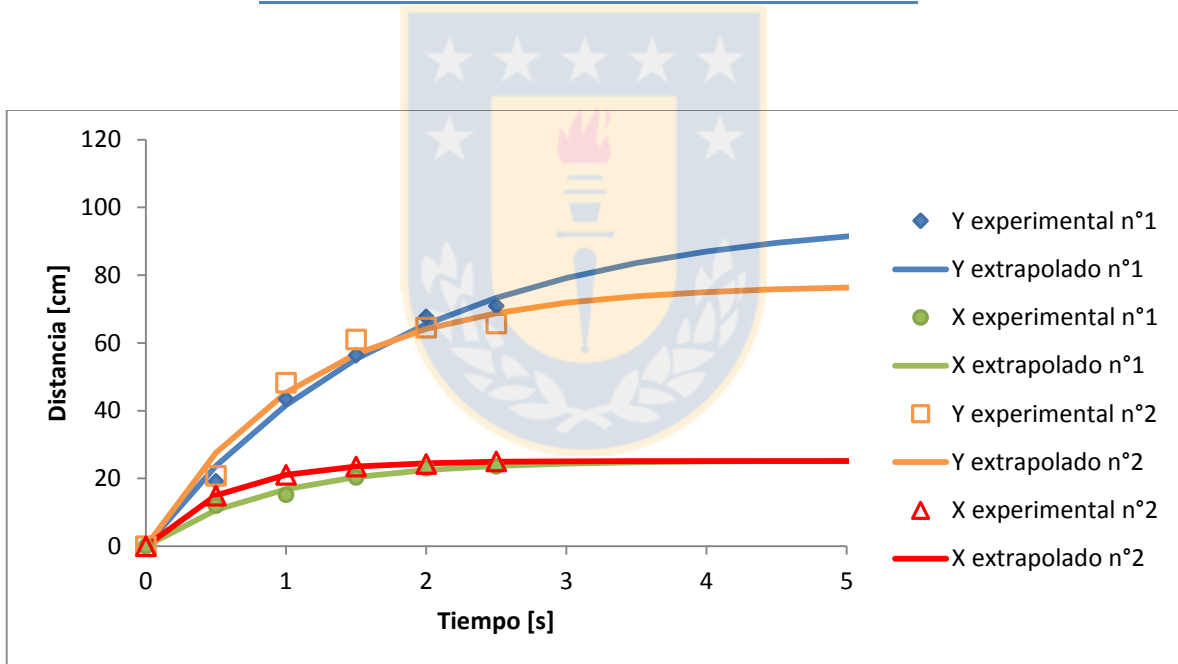


Figura 5.23: Perfil de avance de pulpa de 60% en sólidos dependiendo del tiempo con 3° de inclinación con duplicado.

En la Figura 5.23: Perfil de avance de pulpa de 60% en sólidos dependiendo del tiempo con 3° de inclinación con duplicado. Figura 5.23 se observa un ajuste similar en las dos pruebas realizadas La relación A/L se diferencia un 11,8% de la experiencia 1 y experiencia 2. Se aprecia además que el parámetro  $\tau_x$  tuvo una variación del 24,8%, es decir la experiencia 1 llega al 63,2% de la estabilización antes que en la experiencia 2.

b.3) Prueba con un 52% en sólidos a 5° de inclinación:

Tabla 10: Prueba de escurrimiento con relave a 52% en sólidos a 5° de inclinación.

52% a 5°			
Experiencia n°1		Experiencia n°2	
<b>k<sub>x</sub></b>	21.11	<b>k<sub>x</sub></b>	27.88
<b>τ<sub>x</sub></b>	1.76	<b>τ<sub>x</sub></b>	1.35
<b>k<sub>y</sub></b>	202.66	<b>k<sub>y</sub></b>	667.16
<b>τ<sub>y</sub></b>	29.57	<b>τ<sub>y</sub></b>	32.89
<b>A/L</b>	0.10	<b>A/L</b>	0.04

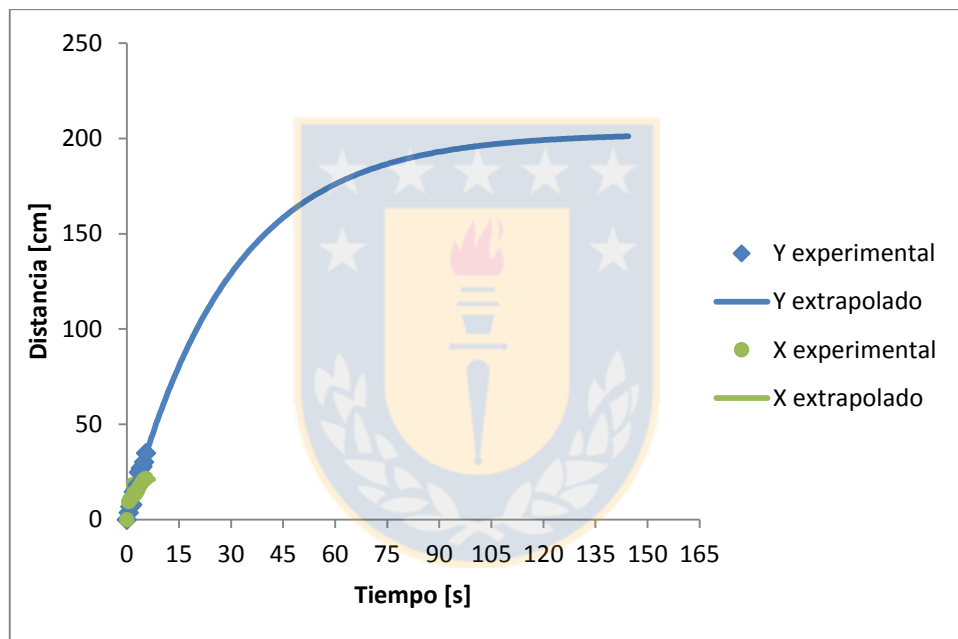


Figura 5.24: Perfil de avance de pulpa de 52% en sólidos dependiendo del tiempo a 5° de inclinación.

Se puede apreciar en la Figura 5.24 que los resultados obtenidos no siguen la lógica del ajuste al modelo matemático, por lo tanto las pruebas con 52% sólidos a 5° de inclinación no son concluyentes en ninguna de las 2 mediciones.

b.4) Prueba con un 60% en sólidos a 5° de inclinación:

Tabla 11: Prueba de escurrimiento con relave a 60% en sólidos a 5° de inclinación

60% a 5°			
Experiencia n°1		Experiencia n°2	
<b>k<sub>x</sub></b>	27.07	<b>k<sub>x</sub></b>	19.74
<b>τ<sub>x</sub></b>	1.07	<b>τ<sub>x</sub></b>	0.92
<b>k<sub>y</sub></b>	75.88	<b>k<sub>y</sub></b>	3.54E+09
<b>τ<sub>y</sub></b>	1.77	<b>τ<sub>y</sub></b>	1.56E+08
<b>A/L</b>	0.36	<b>A/L</b>	5.57E-09

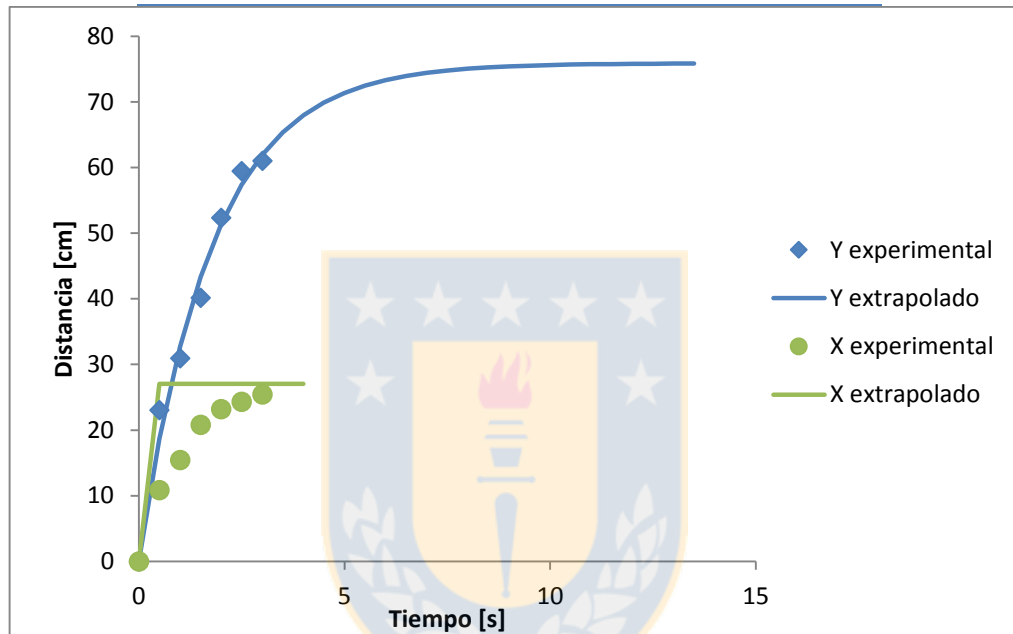


Figura 5.25: Perfil de avance de pulpa de 60% en sólidos dependiendo del tiempo a 5° de inclinación.

Se puede apreciar en la Figura 5.25 que los resultados obtenidos no siguen la lógica del ajuste al modelo matemático, por lo tanto las pruebas con 60% sólidos a 5° de inclinación no son concluyentes en ninguna de las 2 mediciones.

b.5) Prueba con un 52% en sólidos a 7° de inclinación:

Tabla 12: Prueba de escurrimiento con relave a 52% en solidos a 5° de inclinación.

52% a 7°			
Experiencia n°1		Experiencia n°2	
<b>k<sub>x</sub></b>	24.25	<b>k<sub>x</sub></b>	29.82
<b>τ<sub>x</sub></b>	1.32	<b>τ<sub>x</sub></b>	1.68
<b>k<sub>y</sub></b>	65.20	<b>k<sub>y</sub></b>	70.00
<b>τ<sub>y</sub></b>	2.01	<b>τ<sub>y</sub></b>	1.60
<b>A/L</b>	0.37	<b>A/L</b>	0.43

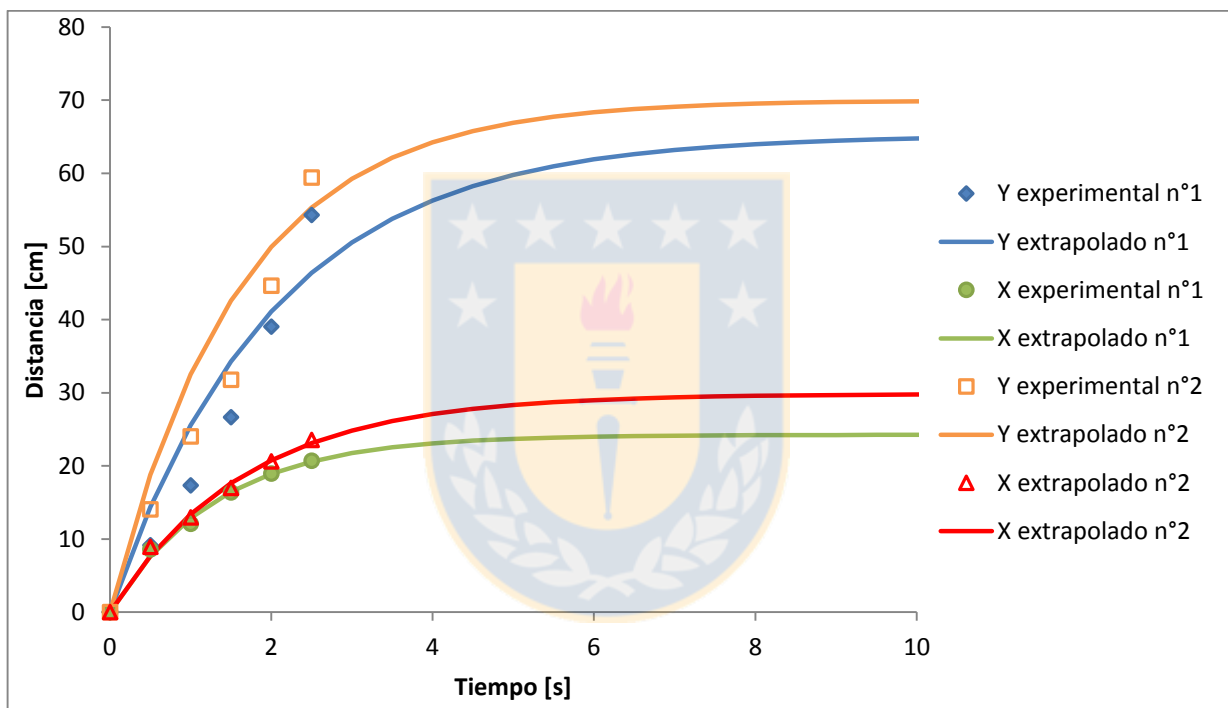


Figura 5.26: Perfil de avance de pulpa de 52% en sólidos dependiendo del tiempo a 7° de inclinación con duplicado.

En la Figura 5.26 se observa un ajuste similar en las dos pruebas realizadas la relación A/L se diferencia un 7,3% de la experiencia 1 y experiencia 2. Se aprecia además que el parámetro  $\tau_x$  tuvo una variación del 12%, es decir la experiencia 1 llega al 63,2% de la estabilización en la coordenada x antes que en la experiencia 2.

b.6) Prueba con un 60% en sólidos a 7° de inclinación:

Tabla 13: Prueba de escurrimiento con relave a 52% en sólidos a 5° de inclinación.

60% a 7°			
Experiencia n°1		Experiencia n°2	
<b>kx</b>	24.55	<b>kx</b>	32.94
<b><math>\tau_x</math></b>	0.71	<b><math>\tau_x</math></b>	2.66
<b>ky</b>	65.79	<b>ky</b>	64.00
<b><math>\tau_y</math></b>	2.15	<b><math>\tau_y</math></b>	2.77
<b>A/L</b>	0.37	<b>A/L</b>	0.51

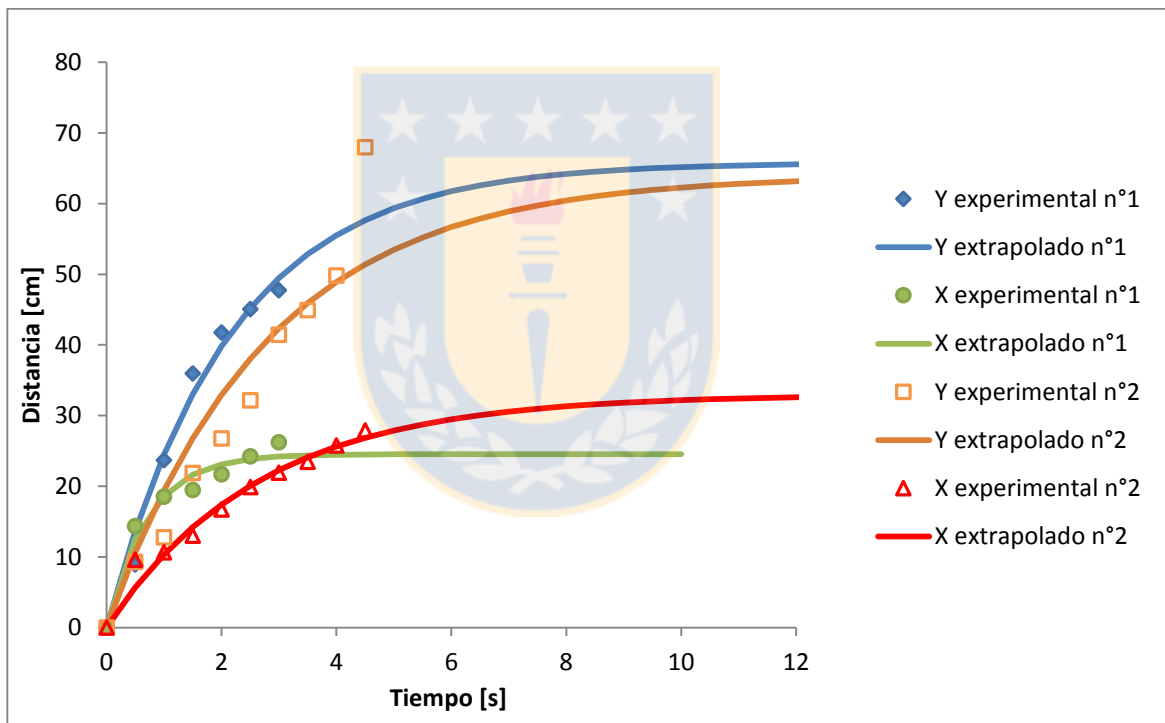


Figura 5.27: Perfil de avance de pulpa de 60% en sólidos dependiendo del tiempo a 7° de inclinación con duplicado.

En la Figura 5.27 se observa un ajuste similar en las dos pruebas realizadas la relación A/L se diferencia un 15,9% de la experiencia 1 y experiencia 2. Se aprecia además que el parámetro  $\tau_x$  tuvo una variación del 59%, es decir la experiencia 1 llega al 63,2% de la estabilización en la coordenada x mucho antes que en la experiencia 2.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Se ha podido diseñar e implementar un montaje experimental para la caracterización de escurrimiento en bandeja para esferas Ballotini y relaves.

En la mayoría de las pruebas realizadas las capas se formaron con una configuración simétrica y de una forma elíptica respecto al eje central, con una variación en la ubicación de las distribuciones usadas en las experiencias. La densidad varía dependiendo de la naturaleza de la mezcla.

Para las pruebas donde la mezcla fue 50% gruesos y 50% finos hubo un comportamiento más homogéneo a lo largo de toda la capa, el empaquetamiento fue mayor que en las pruebas donde las distribuciones son más diferentes entre ellas, esto se debe a la naturaleza de la mezcla, puesto que las partículas más pequeñas se ubican en los intersticios de los espacios que forman la unión de partículas más grandes. En las pruebas donde la predominancia fue las partículas gruesas (95%) la mayor densidad se encuentra en la salida del alimentador, con una drástica disminución a lo largo de toda la capa lo que se mostraría que si habría una diferencia en términos de recuperación de agua.

Para las pruebas de escurrimiento con relaves se logró mostrar una simetría en la mayoría de las pruebas, donde la formación de la capa tuvo un comportamiento lineal.

Para las pruebas en bandeja con relave Los Bronces y ODS a 3° de inclinación, con parámetros de entrada 52% y 60% en sólidos se tuvo un comportamiento similar donde la razón  $\frac{A}{L}$  vario un 26% y 11% respectivamente, cada uno correspondiente a su prueba duplicada. En el mismo caso de entrada pero con 7° de inclinación de la bandeja se obtuvo la razón  $\frac{A}{L}$  donde la variación es de un 7,5% y 15,9% respectivamente.

## Recomendaciones

- La sensibilidad de los resultados luego de la abertura de la válvula es tal, que se recomienda el cambio de esta de manera constante, con el fin de que en todas las pruebas la energía sea la misma.
- En los experimentos se utilizó una masa constante que solo variaba en la mezcla para llegar a un kilo de material, se recomienda que el volumen sea constante y que al momento de la descarga el experimento la energía igual sea constante.
- Se recomienda que el diseño de la bandeja se ajuste a al menos 2 metros para pruebas de escurrimiento donde el % sólidos sea menor a 65%.
- Para las pruebas con relavé se recomienda flocular y cizallar antes de escurrir.



## 7. Bibliografía

1. **Servicio Nacionar de Geología y Minería.** Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves. s.l. : Nelson Ramírez, 31 de Diciembre de 2007.
2. **Ministerio de Minería.** Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves. Santiago : s.n., 2007.
3. **SERNAGEOMIN; SONAMI.** Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves. 2003.
4. **Carmichael, RS.** *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals.* s.l. : Boca Raton, Fla, 1989.
5. **C.C.Furnas.** *The Relations Between Specific Volume, Voids and Sizes Composition in Systems of Broken Solids of Mixed Sizes.* Minneapolis : Dept. of Commerce, Bureau of Mines, 1928.
6. **Westman, A. E. Hugill and H.R.** *The Packing of Particles.* 1930. Vol. 13.
7. **A.Monsalve.** *Reología,Ciencia que Estudia El Movimiento de Fluido.* Santiago : s.n., 2010. Vol. 18.
8. **R.P.CHHABRA.** *Bubbles, Drops and Particles in Non-Newtonian Flluid.* Kanpur : Taylor & Francis Group, 2007.
9. **Galaz, J.** *Estado del Arte en la Disposición de Relaves Espesados.* Santiago : s.n., 2011.
10. **T.G. FITTON, A.G. CRHYSS AND S.N. BHATTACHARYA.** *Tailings Beach Slope Prediction: A New Rheological Method.* Melbourne : Taylor & Francis Group, 2014. Vols. 20, pp 181-202.
11. **Concha, Fernando y Austin , Leonard .** *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación .* Concepción : s.n., 1994 .
12. **Concha A , Fernando .** *Solid - Liquid Separation in the Mining Industry.* Concepción : Springer. Vol. 105. ISBN 978-3-319-02484-4.
13. **Ibarrola, Esteban Luis.** *Introduccion a los Fluidos Newtonianos.* s.l. : Cátedra de la Mecánica de Fluidos - UNCor, 2009.
14. **S.YERAZUNIS, S.W. CORNELL AND BITWINTER.** *Dense Random Packing of Binary Mixtures of Spheres.* New York : Nature, 1965. Vols. 207 ,pp. 835-837.



## 8. Anexos

### Anexo 1 : Densidad real del sólido

Para estimar la densidad del mineral se utilizó el método del picnómetro. Antes de tomar una muestra del mineral, se calibra el picnómetro (Figura 8.1), para esto se pesa el picnómetro hasta que la desviación estándar de al menos 4 mediciones sea menor o igual a 0.02g.



Figura 8.1: Picnómetro de 50 cm<sup>3</sup>

Luego se enrasa con agua destilada y se vuelve a pesar con el propósito de conocer el peso del agua, el cual se obtiene a partir de la diferencia de pesos del picnómetro con agua y el picnómetro vacío pesado anteriormente.

Posteriormente se mide la temperatura del agua y a partir de la Tabla 14 sabemos cuál es la densidad del agua que se encuentra en el picnómetro, con la información anterior es posible determinar el volumen de este.

**Tabla 14: densidad del agua a diferentes temperaturas.**

Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa

Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>	Temperatura °C	Densidad kg / m <sup>3</sup>
0 (hielo)	917,00	33	994,76
0	999,82	34	994,43
1	999,89	35	994,08
2	999,94	36	993,73
3	999,98	37	993,37
4	1000,00	38	993,00
5	1000,00	39	992,63
6	999,99	40	992,25
7	999,96	41	991,86
8	999,91	42	991,46
9	999,85	43	991,05
10	999,77	44	990,64
11	999,68	45	990,22
12	999,58	46	989,80
13	999,46	47	989,36
14	999,33	48	988,92
15	999,19	49	988,47
16	999,03	50	988,02
17	998,86	51	987,56
18	998,68	52	987,09
19	998,49	53	986,62
20	998,29	54	986,14
21	998,08	55	985,65
22	997,86	56	985,16
23	997,62	57	984,66
24	997,38	58	984,16
25	997,13	59	983,64
26	996,86	60	983,13
27	996,59	61	982,60
28	996,31	62	982,07
29	996,02	63	981,54
30	995,71	64	981,00
31	995,41	65	980,45
32	995,09	66	979,90

Luego de la calibración se toman 10 g de muestra los cuales se depositan en el picnómetro para así luego formar una pulpa dentro de este, cabe destacar el cuidado que debe haber de no dejar ningún sólido en las paredes, es decir que todo el sólido se encuentre como pulpa hasta una altura media del picnómetro.

Seguidamente se coloca el picnómetro y un vaso precipitado junto con agua en el desecador (Figura 8.2) conectándolo al vacío por una hora.



Figura 8.2: Desecador de laboratorio de vidrio.

Se debe agitar la pulpa cada 15 minutos para que todas las burbujas atrapadas salgan de esta. Después de pasada la hora en el desecador se llena el picnómetro con agua destilada hasta aforar para así luego tapar el instrumento, cuya tapa contiene un capilar el cual debe rebalsar, el siguiente paso es pesar el picnómetro, Con los datos anteriores se infiere en el siguiente cálculo:

$$M_T = M_{picnometro} + M_{sólido} + M_{agua} \quad (8.1)$$

Es decir,

$$M_{agua} = M_T - M_{picnometro} - M_{sólido} \quad (8.2)$$

Teniendo en cuenta que tenemos la información anterior se puede desarrollar la siguiente ecuación:

$$V_{picnometro} = V_{sólido} + V_{líquido} \quad (8.3)$$

Para luego,

$$V_{picnometro} = V_{líquido} + \frac{M_{sólido}}{\rho_{sólido}} \quad (8.4)$$

Para finalmente obtener la densidad del sólido:

$$\rho_{sólido} = \frac{M_{sólido}}{V_{picnometro} - V_{líquido}} \quad (8.5)$$

Cabe destacar que para tener un resultado más representativo se realizaron 3 pruebas con distintas muestras del mismo material y a partir de esos resultados se saca un promedio de las 3 densidades dadas, si es que hay una muestra que difiere mucho de las otras 2 se debe repetir, puesto que los resultados no deberían variar tanto.

## Anexo 2: Granulometría

Se emplearon dos métodos de análisis granulométrico la primera empleando tamices ASTM y el segundo empleando el equipo SYMPATEC HELOS VECTRA, en el Anexo 2 se puede apreciar la metodología de ambos casos.

En el primer caso el material fue sometido a una separación mecánica por medio de una serie de tamices compuestos por mallas estándar ensamblados es un equipo VIBROTAMIZ. Se pesó 200 grs de muestra y se colocó el material en el tamiz superior de la serie y se dejó actuar por 15 min. Se pesaron las fracciones retenidas de cada tamiz. Con los datos obtenidos se realizó una curva granulométrica y determino el tamaño de partícula correspondiente al 80% del material pasado (P80).

Para la medición de tamaño de partícula empleando el equipo SYMPATEC HELOS VECTRA se empleó el material seco con distribución de aire comprimido y se determinó los valores de X10, x5, x50, x63.2, x90, x80.

## Anexo 3: Determinación de densidad de agua clara:

Se determine la densidad del líquido como se aprecia en la siguiente inferencia:

$$M_{total} = M_{picnómetro} + M_{líquido} \quad (8.6)$$

Es decir:

$$M_{total} = M_{picnómetro} + M_{líquido}$$

$$M_{líquido} = M_{total} - M_{picnómetro}$$

Sabemos que

$$V_{líquido} = V_{picnómetro} = 50 \text{ cm}^3 \quad (8.7)$$

$$\rho_{\text{liquido}} = \frac{M_{\text{liquido}}}{V_{\text{liquido}}} \quad (8.8)$$

Luego de pesar el picnómetro lleno se recupera el líquido en los vasos precipitados, se lava el picnómetro y luego con la ayuda de una estufa se seca para luego repetir con los otros ensayos, se debe tener cuidado de que el picnómetro se encuentre limpio y seco a la hora de proceder a estimar las otras densidades.

#### Anexo 4: Preparación de muestras para el sedirack.

La columna donde se preparan las muestras alcanzan un volumen de llenado de 1200 ml, con esta información se obtuvo la siguiente inferencia.

O sea,

$$V_{\text{total}} = V_{\text{solido}} + V_{\text{liquido}} \quad (8.9)$$

$$1200 = V_{\text{solido}} + V_{\text{liquido}} \quad (8.10)$$

Se tiene

$$1200 = \frac{M_s}{\rho_s} + \frac{M_l}{\rho_l} \quad (8.11)$$

Despejamos  $M_l$  y se conoce que  $\rho_l = 1 \text{ g/cm}^3$

$$M_l = 1200 - \frac{M_s}{\rho_s} \quad (8.12)$$

Con lo anterior, más la información que obtenemos a partir de la ecuación de porcentaje de sólidos se puede calcular la proporción de sólidos y agua que son necesarios para la conformación de la pulpa a estudiar.

$$\%S = \frac{M_s}{M_s + M_l} \quad (8.13)$$

Despejando e incorporando la ecuación anterior se tiene:

$$\%S \cdot M_s + \%S \cdot M_l = M_s \quad (8.14)$$

$$\%S \cdot M_s + \%S \cdot \left(1200 - \frac{M_s}{\rho_s}\right) = M_s \quad (8.15)$$

Entonces:

$$\%S \cdot 1200 = M_s + \%S \cdot \frac{M_s}{\rho_s} - \%S \cdot M_s \quad (8.16)$$

Despejando  $M_s$

$$M_s \cdot \left(1 + \frac{\%S}{\rho_s} - \%S\right) = \%S \cdot 1200 \quad (8.17)$$

$$M_s = \frac{\%S \cdot 1200}{\left(1 + \frac{\%S}{\rho_s} - \%S\right)} \quad (8.18)$$

Finalmente se llega a una ecuación donde los datos son conocidos y es posible calcular la masa necesaria de relave que se necesita para ciertas conformaciones de pulpa a estudiar, en este caso son de 52% y 60% para la caracterización de aguas claras. Cabe destacar que luego de conocer las cantidades de sólido en cuestión se conoce el volumen de líquido a utilizar.

$$M_l = 1200 - \frac{M_s}{\rho_s} \quad (8.19)$$

Se conoce que  $\rho = \frac{M}{V}$  por lo tanto:

$$\rho_l \cdot V_l = 1200 - \frac{M_s}{\rho_s}$$

Con  $\rho_l = 1 \text{ g/cm}^3$

$$V_l = 1200 - \frac{M_s}{\rho_s} \quad (8.20)$$

Anexo 5: Ejemplo de cálculo de la densidad de la fase clara relave ODS y Los bronces.

El cálculo de la densidad se hizo mediante la ayuda de un picnómetro, el cual se pesa antes de rebosar este con la muestra correspondiente, para luego hacer el cálculo de la densidad.

Ejemplo de cálculo:

Volumen picnómetro 185:  $50.049 \text{ g/cm}^3$

Peso picnómetro 185: 31.146 g

Peso picnómetro 185 con muestra: 81.150 g

Entonces

$$M_{muestra} = 81.150 \text{ g} - 31.146 \text{ g} \quad (8.21)$$

$$M_{muestra} = 50.004 \text{ g} \quad (8.22)$$

Se sabe que

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (8.23)$$

$$\rho = \frac{50.004 \text{ g}}{50.049 \text{ cm}^3} \quad (8.24)$$

Para luego:

$$\rho = 0.99910 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad (8.25)$$

## Anexo 6 : resultados de la caracterización de la fase clara

Resultados de la caracterización de aguas claras luego de tomar muestras de al menos 100 ml que se preparó previamente en el sedirack a distintos porcentajes en sólidos.

**Tabla 15: Resultado de la caracterización de la fase clara de relave ODS y los bronces.**

Tipo de relave	Porcentaje en sólidos	h	h <sub>i</sub>	Densidad	PH	Turbidez
	(%)	(cm)	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )		(NTU)
<b>ODS</b>	52	31,1	16.8	0.99910	7.12	192.75
	60	31,3	20.2	0.99972	7.41	122.25
<b>Los Bronces</b>	52	31,3	20.9	0.99924	7.82	378.75
	60	31,5	26.8	1.00010	7.79	261.0