

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesores Patrocinantes:**

Dr. Fernando Betancourt C.

**Ingenieros Supervisores:**

Pablo Espinoza G.

**EFEECTO DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS, pH y FLOCULANTE EN YIELD STRESS DE  
RELAVES PRODUCIDOS EN PLANTA DE PELLETS.**

**GERARDO SAAVEDRA VENEGAS**

Informe de Memoria de Título  
Para Optar al Título de  
Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril 2019



## RESUMEN

Actualmente en Planta de Pellets, de CAP MINERIA, se está desarrollando el proyecto relaves a tierra que contempla el transporte de relaves en forma de pulpa por distancias mayores a 50 km y a varios metros sobre el nivel del mar y una de las variables que impactan significativamente en el transporte por tuberías es el comportamiento reológico que presente la pulpa. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la concentración de sólidos, pH y floculante en la variable yield stress. Además, se realizaron mediciones a tres pulpas obtenidas de diferentes condiciones de procesamiento y características. Para la obtención del yield stress se utilizaron los sensores vane FL-10 y FL-100 en el viscosímetro rotacional Haake VT550.

Para las tres muestras en estudio los resultados indican que un aumento en la concentración de sólidos tiene como respuesta un aumento significativo en el yield stress de la pulpa, dicho efecto tiende a ser de forma exponencial. Respecto a la variable pH los menores valores de yield stress se obtuvieron a pH natural, seguidos por pH=9 y obteniéndose los mayores valores a pH alcalino 11. Respecto al floculante se analizó que, a todas las concentraciones de sólidos y valores de pH estudiados, existe un efecto del floculante que hace aumentar los valores de yield stress de la pulpa.

De las muestras analizadas, se obtuvo que la muestra 2, correspondiente a relave obtenido del procesamiento de preconcentrado básico, obtuvo menores valores de yield stress que las muestras 1 y 3. Este efecto está asociado a una menor granulometría presente en las muestras 1 y 3 que tiene como consecuencia mayor presencia de partículas finas y cambios en la reología de la pulpa. Los resultados de DRX muestran similitudes en la mineralogía de las muestras por lo que se descarta el efecto de esta variable en los yield stress obtenidos.

## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	<b>INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	1
1.2	<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	2
1.3	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	2
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA EMPRESA .....</b>	<b>3</b>
2.1	<b>GEOGRAFIA DE PLANTA DE PELLETS .....</b>	3
2.2	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO .....</b>	3
2.3	<b>Productos y preconcentrados procesados en PP.....</b>	6
2.4	<b>Relaves producidos en Planta de Pellets.....</b>	7
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES TEORICOS.....</b>	<b>8</b>
3.1	<b>Reología.....</b>	9
3.2	<b>Yield Stress.....</b>	11
3.3	<b>Medición Yield Stress.....</b>	11
3.4	<b>Factores que influyen en la reología .....</b>	15
3.4.1	<b>Concentración .....</b>	15
3.4.2	<b>Granulometría.....</b>	16
3.4.3	<b>pH.....</b>	17
3.4.4	<b>Temperatura .....</b>	17
3.5	<b>Cuarzo y química de Superficies.....</b>	18
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>20</b>
4.1	<b>Diseño Experimental.....</b>	20
4.2	<b>Muestras y reactivos a utilizar. ....</b>	21
4.2.1	<b>Obtención Muestras.....</b>	21
4.2.2	<b>Caracterización Muestras.....</b>	23
4.2.2.1	<b>Análisis distribución de tamaño de partículas MASTERSIZER .....</b>	23
4.2.2.3	<b>Ensayo Dtt para determinar Fe magnético .....</b>	26
4.2.2.4	<b>Medición GER.....</b>	26
4.2.2.5	<b>Difracción Rayos X.....</b>	27
4.3	<b>Equipos y procedimiento .....</b>	27
4.3.1	<b>Preparación pulpa de relave a distinta concentración sólidos.....</b>	27
4.3.2	<b>Pruebas para determinación yield stress.....</b>	29
4.3.3	<b>Estimación concentración de sólido de la pulpa.....</b>	31

<b>5</b>	<b>Resultados y discusiones.</b>	<b>33</b>
5.1	Efecto concentración de sólidos y pH.	33
5.2	Efecto floculante.	36
5.3	Comparación Yield stress muestras distinta condición procesamiento.	38
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.</b>	<b>40</b>
	Anexo 1: Ejemplo de cálculo de yield stress con método vane.	43
	Anexo 2: Estimación Fe magnético con ensayo de tubo Davis DTT.	44
	Anexo 3: Dimensiones recipiente para prueba con sensor Vane.	45



## Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de procesos Planta de Pellets.....	6
Figura 2: Esquema de fluido entre placa fija y móvil desplazada por una fuerza aplicada F .....	9
Figura 3: Comportamiento fluidos newtonianos y no newtonianos.. .....	10
Figura 4: Reograma ajustado con modelo Bingham. Medición en negro y ajuste Bingham en rojo.....	12
Figura 5: Esquema de una paleta de cuatro hojas Sensor Vane.....	13
Figura 6: Grafico torque versus tiempo utilizando sensor Vane. ....	13
Figura 7: Respuesta típica de yield stress frente a cambios en la concentración. ....	16
Figura 8: Efecto del tamaño de partícula en Reología Pulpas Limonita.....	17
Figura 9: Efecto de la temperatura en la viscosidad relativa de pulpa de limonita. ....	18
Figura 10: Potencial zeta del Cuarzo en función del pH.....	19
Figura 11: Espesador de relaves 3. Planta de Pellets.....	22
Figura 12: Cajon disipador previo a espesador de relaves 3. Planta de pellets. ....	22
Figura 13: Isocontenedores con muestra de relaves. Planta de pellets. ....	22
Figura 14: Análisis granulométrico en MASTERSIZER por duplicado Muestra 1. ....	23
Figura 15: Análisis granulométrico en MASTERSIZER por duplicado Muestra 2 .....	24
Figura 16: Análisis granulométrico en MASTERSIZER por duplicado Muestra 3 .....	24
Figura 17: Granulometría Muestras 1,2 y 3. ....	25
Figura 18: Medición pH de pulpa sometida a agitación.....	28
Figura 19: Agitador mecánico y tacómetro medición rpm .....	29
Figura 20: Viscosímetro Hakke VT550 Sala de precisión laboratorio de Ingeniería Metalúrgica .....	29
Figura 21: Sensor Vane FL-10 y FL-100 .....	30
Figura 22: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 1 sin floculante a pH natural, 9 y 11.....	34
Figura 23: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 1 con floculante a pH natural y 9. ....	34
Figura 24: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 2 con floculante a pH natural, 9 y 11.....	35
Figura 25: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 3 sin floculante a pH natural, 9 y 11.....	35
Figura 26: Eficiencia de coagulación de partículas de cuarzo en función del pH y en presencia de iones calcio y magnesio.. .....	36
Figura 27: Yield stress en función de la concentración de sólidos para pulpa floculada y no floculada a pH natural.....	37
Figura 28: Yield stress en función de la concentración de sólidos para pulpa floculada y no floculada a pH 9. ....	37
Figura 29: Yield Stress en función de la concentración de sólidos muestras 2 y 3 a pH 11 .....	38
Figura 30: Yield Stress en función de la concentración de sólidos muestras 1, 2 y 3 a pH 9 .....	38
Figura 31: Yield stress en función de la concentración de sólidos muestras 1, 2 y 3 a pH Natural.....	39
Figura 32: Curva Torque máximo utilizando método vane .....	43
Figura 33: Ejemplo estimación yield stress con metodo vane .....	44
Figura 34: Dimensiones recipiente para medición Sensor Vane .....	45

### Índice de Tablas.

Tabla 1: Características de los productos de Planta de Pellets .....	7
Tabla 2: Variables consideradas en diseño Experimental .....	20
Tabla 3: Parámetros granulometría Muestras 1,2 y 3.....	25
Tabla 4: Caracterización por Ley Hierro muestras 1,2 y 3. ....	25
Tabla 5: Caracterización por Ley Hierro magnético muestras 1,2 y 3.....	26
Tabla 6: Densidad Mineral Muestras 1,2 y 3. ....	26
Tabla 7: Dimensiones y nombre de las paletas.....	30
Tabla 8: Resumen Caracterización Muestras 1,2 y 3.....	39



**Nomenclatura y abreviaturas.**

**PP:** Planta de Pellets.

**p80:** Tamaño de abertura del tamiz que deja pasar el 80% de las partículas de la muestra.

**%-#325:** % de partículas de la muestra con tamaño menor a la abertura de la malla 325.

**DRX:** Difracción Rayos X

**Min.:** Mínimo

**Max.:** Máximo

**UDA:** Universidad de Atacama

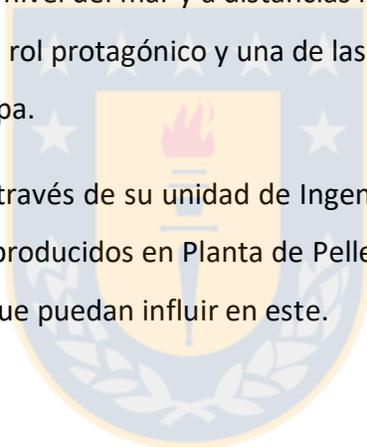


# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Planta de Pellets (PP) de CAP MINERIA, es una planta de procesamiento de minerales de hierro que tiene como objetivo la producción de pellets desde un pre concentrado extraído en Mina Los Colorados. Dentro de los distintos procesos que se llevan a cabo existe una etapa de concentración en la cual se genera una corriente baja en el elemento de interés denominada comúnmente cola o relave que en la actualidad es llevada al proceso de espesamiento para posteriormente ser depositada en la Bahía de Chapacos. Debido a una restricción por parte de la autoridad ambiental, CAP MINERIA se vio en la obligación de buscar distintas alternativas para el procesamiento, transporte y depositación de estos Relaves. Al momento de considerar lugares de depositación ubicados a varios metros sobre el nivel del mar y a distancias mayores a los 50 km, el transporte de relave en forma de pulpa toma un rol protagónico y una de las variables críticas en dicho transporte es la Reología que presenta la pulpa.

Es así como Cap Minería, a través de su unidad de Ingeniería Metalúrgica, decidió realizar un estudio de la reología de relaves producidos en Planta de Pellets con el objetivo de conocer el yield stress de la pulpa y las variables que puedan influir en este.



## 1.2 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de las variables concentración de sólidos, pH y floculante en el yield stress de relaves producidos en Planta de Pellets

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Llevar a cabo la puesta en marcha de viscosímetro rotacional Hakke VT550 para medición de yield stress con sensor vane.
- Medición yield stress a relaves de PP a distintas concentraciones de sólidos, pH y condición floculante.
- Medición yield stress a relaves de PP obtenidos en distintas condiciones de procesamiento.



## 2 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

### 2.1 GEOGRAFIA DE PLANTA DE PELLETS

Planta de Pellets se ubica dentro del complejo Minero-Industrial denominado VALLE DEL HUASCO, ubicado en la tercera región de Atacama-Chile. Este está conformado por Mina los Colorados, Puerto Guacolda 2 y la mencionada PP ubicada en la provincia de Huasco.

### 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

La operación comienza en Mina Los Colorados donde la roca es extraída desde el yacimiento para posteriormente llevarla a un proceso de reducción de tamaño y clasificación, compuesto por las etapas de chancado primario, secundario y prensa de rodillos, todos con su respectiva etapa de clasificación de tamaño mediante harneros. El producto fino es llevado a una etapa de concentración magnética en seco donde, aprovechando las propiedades magnéticas que presentan algunos minerales de hierro, se obtiene un producto de entre 52 y 64% de hierro denominado preconcentrado y una segunda corriente baja en ley de hierro magnético que constituye los rechazos de la operación-Mina los colorados.

El preconcentrado obtenido desde Mina Los Colorados, conformado principalmente por magnetita, es transportado 86 km vía ferrocarril a PP donde es almacenado y homogenizado en las canchas de recepción para posteriormente llevarlo a los procesos de:

- Circuito de molienda y clasificación, que tiene como objetivo la liberación del mineral de interés mediante la reducción de tamaño desde una granulometría de 4 mm hasta un  $p_{80}$  de 44  $\mu\text{m}$ . El circuito está compuesto por tres molinos de 6.000 HP y 16,5 x 37,5 pies, más un molino de 9.000 HP y 20 x 38 pies. Posterior a la molienda la pulpa es clasificada por tamaño en baterías de hidrociclones obteniéndose un bajo flujo que es recirculado al proceso y un sobre flujo que es llevado a la etapa de concentración.

- Concentración en hidroseparadores y baterías magnéticas, que tiene por objetivo la separación del mineral de interés, magnetita, del mineral de ganga conformado principalmente por sílice.

La pulpa correspondiente al sobre flujo del hidrociclón es alimentada a un hidroseparador donde, aprovechando la diferencia de densidades entre la magnetita y la sílice, ocurre una sedimentación diferencial donde parte de las impurezas son eliminadas en el sobre flujo. El bajo flujo correspondiente a la pulpa de alta ley de hierro es llevado a concentración en baterías magnéticas donde es expuesto a la acción de un campo magnético que capta las partículas que presentan propiedades magnéticas separándolas de las que presentan nulo magnetismo. Dependiendo de si es etapa primaria o de limpieza, las baterías magnéticas pueden estar compuestas por tambores que van desde las 36 hasta 48 pulgadas de diámetro, entregando campos magnéticos que van desde los 750 hasta los 1000 Gauss de intensidad. Las dos corrientes obtenidas en este proceso son llevadas a sus respectivos espesadores, de concentrado para la corriente alta en hierro y espesador de relaves para la corriente baja en hierro y alta en sílice.

- Espesamiento, que tiene como objetivo la recuperación de agua que posteriormente es recirculada al proceso.

El sobre flujo de los hidroseparadores y el rechazo de las baterías magnéticas son llevados a dos espesadores de relaves que trabajan en serie, espesador uno de 61 metros de diámetro y espesador tres de 55 metros de diámetro, obteniéndose un relave final del orden del 50 % de concentración de sólidos que es descartado a través de un conducto submarino hacia el mar.

En el caso del bajo flujo del espesador de concentrado, que sale con una concentración de sólidos de aproximadamente 70 %, es llevado a las etapas posteriores de filtrado, balling y endurecimiento térmico.

Paralelamente el agua obtenida del sobreflujo de los espesadores de colas uno y tres, más el sobreflujo del espesador de concentrados, es llevada a un estanque para posteriormente ser recirculada a los distintos procesos demandantes de agua en PP.

- Filtrado, disminuyendo el agua del concentrado desde un 70% de concentración de sólidos hasta una humedad residual del 8 a 9 %. Para lograr esto PP utiliza siete filtros de discos al

vacío que en conjunto entregan una superficie de filtrado de 875 metros cuadrados. Del proceso de filtrado se obtienen dos productos, el primero es un concentrado que ya cumple con condiciones para ser comercializado y es llevado directamente a embarque para ser vendido como pellet feed. El segundo es el concentrado que sigue en el proceso con el objetivo de obtener otros productos de calidades química y mecánicas mayores.

- Balling y endurecimiento térmico, que busca un aumento en las propiedades mecánicas, químicas y físico-metalúrgicas del concentrado para ser comercializado como pellet. Para esto el queque obtenido del filtrado es llevado a los buzones de almacenamiento donde se le adiciona cal hidratada y caliza que actúan como aglomerantes en el proceso de peletización. Luego desde cada buzón se alimenta hacia discos peletizadores obteniéndose el producto denominado pellet green que es clasificado por tamaños mediante harneros de rodillos.

El pellet green que cumple con la granulometría requerida es llevado al proceso de endurecimiento térmico donde se produce el endurecimiento del pellet y la oxidación de la magnetita aplicando temperaturas sobre los 1120 °C en los equipos de PP conformados por un horno de parillas, un horno rotatorio y un enfriador anular, de los que se obtienen el producto final de PP denominado pellet producto.

Luego de realizar controles que permitan asegurar la calidad del producto que se está elaborando, el pellet feed obtenido del filtrado y el pellet producto obtenido de la etapa de balling y endurecimiento Térmico son enviados mediante correas transportadoras al Puerto Guacolda 2, ubicada en las cercanías de PP donde son embarcados para su transporte en barcos a clientes ubicados en distintos lugares del mundo.

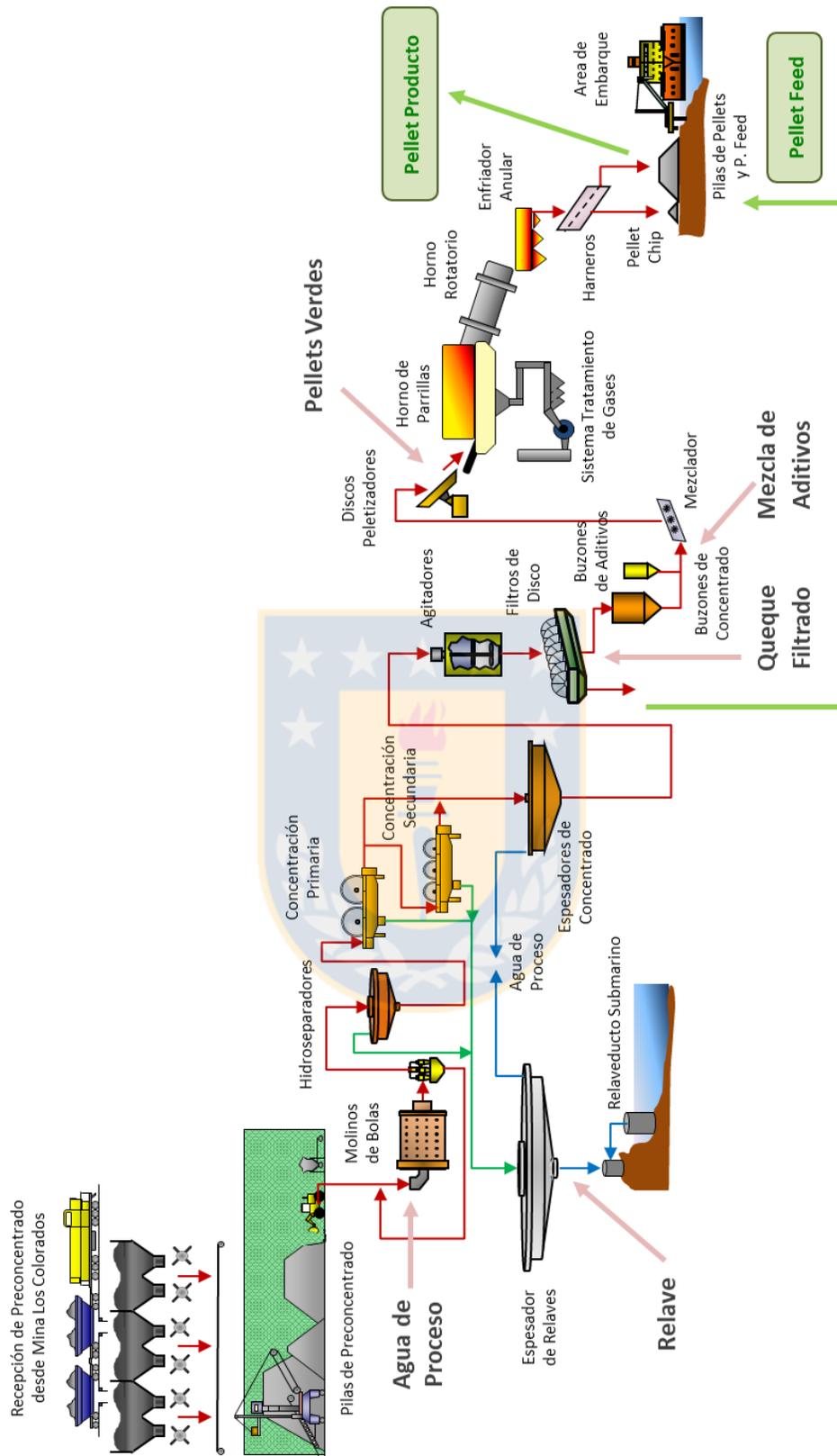


Figura 1: Diagrama de procesos Planta de Pellets

### 2.3 Productos y precentrados procesados en PP.

Existen distintas tecnologías en la producción de acero y estas utilizan como materia prima pellets de diferentes características. Por consiguiente, existe la necesidad de producir pellets de diferentes dimensiones y composiciones químicas que se muestran en la tabla adjunta;

Tabla 1: Características de los productos de Planta de Pellets

Producto	Ley	Dimensiones	Uso
Pellet Básico o Autofundente	64 % Fe mínima 1,8 % SiO <sub>2</sub> máxima	9 a 16 mm 85% mínimo. Menor a 5 mm 4% max.	Alimentación Alto hornos y proceso Corex
Pellet Reducción Directa	66,4 % Fe mínima 1,8 % SiO <sub>2</sub> máxima	9 a 16 mm 89% mínimo. Menor a 6,3 mm 2% máxima.	Proceso HyL y MYDREX
Pellet Feed	68,0 % Fe mínimo 2,3 % SiO <sub>2</sub> máxima	Menor a 44 micrones 755 mínimo	Carga proceso aglomeración y producción Pellets
Pellet Chips	65 % Fe mínimo	Menor a 8 mm	Lavado de carbones y proceso sinterización
Sinter Feed	63% Fe mínimo 6 % SiO <sub>2</sub> máxima	5 % máximo SOBRE 6,3 mm	

Dependiendo del tipo de pellets que se desee producir, PP le solicita a Mina Los Colorados enviar Preconcentrado de 3 calidades distintas. Preconcentrado básico de ley 58%, preconcentrado RD de ley 61% y Sinter Feed de ley 63%.

#### 2.4 Relaves producidos en Planta de Pellets.

Del proceso de concentración en húmedo se obtiene un relave en pulpa que en el año 2017 fue de 1,37 millones de toneladas sólidas. La granulometría de este relave, que viene dada por la etapa de molienda y clasificación, es de un  $d_{80}=51,6 \mu\text{m}$  y  $d_{50}=15,5 \mu\text{m}$  <sup>[1]</sup>. La composición química, como se menciona en 2.3 viene dado por la campaña que se esté realizando y la concentración de sólidos de la pulpa es de entre 50 y 55 %.

Con el objetivo de mejorar el proceso de sedimentación dentro del espesador, se agrega reactivo floculante a una dosificación de 30 g/t. Sin embargo, en la actualidad PP funciona con los espesadores uno y tres en una configuración en serie lo que dificulta la obtención de un relave que asegure la dosificación esperada.



### 3 ANTECEDENTES TEORICOS

### 3.1 Reología

El transporte de pulpas a través de canaletas o tuberías viene dado por condiciones externas al fluido como una diferencia de presión o altura y por condiciones propias del fluido transportado como su reología. Las variables utilizadas en la caracterización de la pulpa que esta área estudia son la viscosidad y el yield stress. Básicamente, la viscosidad es la resistencia que presenta un fluido a fluir, ósea que si nosotros deseamos transportar una pulpa mineral con mayor viscosidad la energía requerida será mayor que la requerida para transportar un fluido de viscosidad menor. De forma similar el yield stress o esfuerzo de fluencia de un fluido está relacionado al esfuerzo mínimo que debe ser sometido un fluido para que este comience a fluir.

La reología además hace uso de las variables esfuerzo de cizalle y velocidad de cizalle para explicar los fenómenos que dominan la deformación y el fluir de la materia. En la figura 2 se presenta un fluido ubicado entre una placa fija y una placa móvil separadas por una distancia  $y_0$ . Si la placa móvil, de área superficial  $A$ , se mueve con una velocidad  $v$  a causa de una fuerza aplicada  $F$ , el esfuerzo de cizalle  $\tau$  queda definido como la relación entre la fuerza  $F$  aplicada para generar el movimiento y el área  $A$  de la superficie. La razón de corte  $\dot{\gamma}$  corresponde al diferencial entre la velocidad  $dv$  que experimenta el fluido a lo largo de la distancia  $dy$  <sup>[2]</sup>.

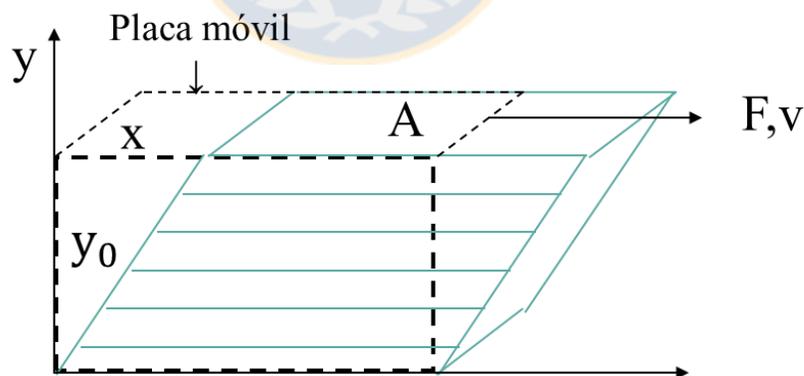


Figura 2: Esquema de fluido entre placa fija y móvil desplazada por una fuerza aplicada  $F$

Según la relación que exista entre el esfuerzo de cizalle y la velocidad de cizalle, la reología clasifica a los fluidos como newtonianos y no newtonianos. Los fluidos newtonianos son los que presentan una relación lineal entre el esfuerzo de cizalle y la velocidad de cizalle y al graficar estas

dos variables el resultado es una línea recta cuya pendiente corresponderá a la viscosidad del fluido. Un ejemplo de este tipo de fluido es el agua.

$$\tau = \mu * \dot{\gamma} ; \dot{\gamma} \neq 0 \quad (3.1.1)$$

Por el contrario, si la relación entre el esfuerzo y la velocidad de cizalle no es lineal, el fluido corresponde a uno no newtoniano donde la viscosidad varía en función de la velocidad de cizalle. Como es sabido, la mayoría de las pulpas minerales presentan comportamiento de fluido no newtoniano [3].

A su vez, dependiendo de la relación que exista entre el esfuerzo y la velocidad de cizalle, los fluidos no newtonianos se sub clasifican en cuatro tipos como se muestra en la figura 3:

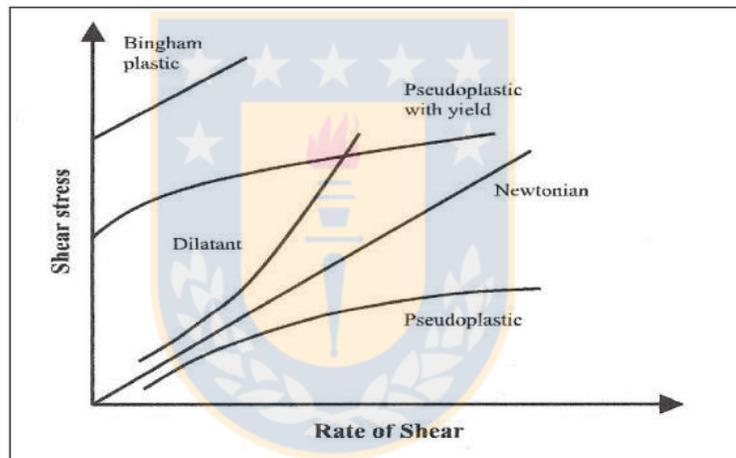


Figura 3: Comportamiento fluidos newtonianos y no newtonianos. Fuente: Mingzhao 2014 [4].

- Fluido plástico de Bingham: En estos fluidos es necesario un esfuerzo de cizalle alto para que comiencen a fluir. Posterior a este esfuerzo el fluido presenta una viscosidad constante
- Fluido pseudoplástico: La viscosidad de estos fluidos es máxima para valores bajos de velocidad de cizalle. Luego la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de cizalle hasta alcanzar un valor constante.
- Fluido dilatante: La viscosidad de estos fluidos es mínima para valores bajos de velocidad de cizalle. Luego la viscosidad aumenta junto a la velocidad de cizalle hasta alcanzar un valor constante.

- Fluido Pseudoplástico con yield stress: En estos fluidos es necesario un esfuerzo de cizalle mínimo para comiencen a fluir. Luego la viscosidad disminuye con el aumento de velocidad de cizalle hasta alcanzar un valor constante.

### 3.2 Yield stress

Algunos de los primeros conceptos enseñados por la cinemática cuando se estudia el movimiento de los cuerpos son los de fuerza de roce cinético y estático. Esta señala que para que exista movimiento de un cuerpo que está sometido al roce, debe existir una fuerza lo suficientemente alta para que se venza el roce producido por la interacción entre el cuerpo y la superficie. Si se aplica una fuerza menor a la fuerza de roce estático el cuerpo no se mueve, y al contrario si se aplica una fuerza mínimamente mayor a la de roce estático el cuerpo comienza a moverse y se ve sometida a una fuerza ahora de roce cinético.

De forma similar, los sistemas de suspensiones concentradas sólido-líquidas presentan distintos comportamientos frente a esfuerzos de distinta magnitud. Cuando el fluido se ve sometido a bajos esfuerzos el sistema se deforma elásticamente y no fluye, en cambio si el esfuerzo aplicado sobre el fluido es mayor a cierto valor, el material fluye como un fluido viscoso <sup>[5]</sup>. El yield stress puede ser entendido como una propiedad del material que denota la transición entre un comportamiento “comúnmente sólido” a un comportamiento “comúnmente líquido”.

Sistemas donde se aprecia este fenómeno son las pulpas minerales y dicho efecto se ve potenciado por la presencia de floculante utilizado en los procesos de sedimentación. En suspensiones floculadas, las partículas se adhieren formando flóculos que interactúan unos con otros formando una estructura de red tridimensional continua que se extiende a través de todo el volumen ocupado por la suspensión. El yield stress se asocia a la fuerza por unidad de área requerida para quebrar esta estructura de red que se forma en la pulpa.

### 3.3 Medición yield stress

Existen distintas metodologías para medición de yield stress. De las más convencionales están los viscosímetros con sensor cilíndrico que entregan los reogramas de la pulpa en estudio. Luego

aplicando modelos, que en el caso de pulpas minerales corresponde al modelo de Bingham, es posible obtener las variables viscosidad y yield Stress.

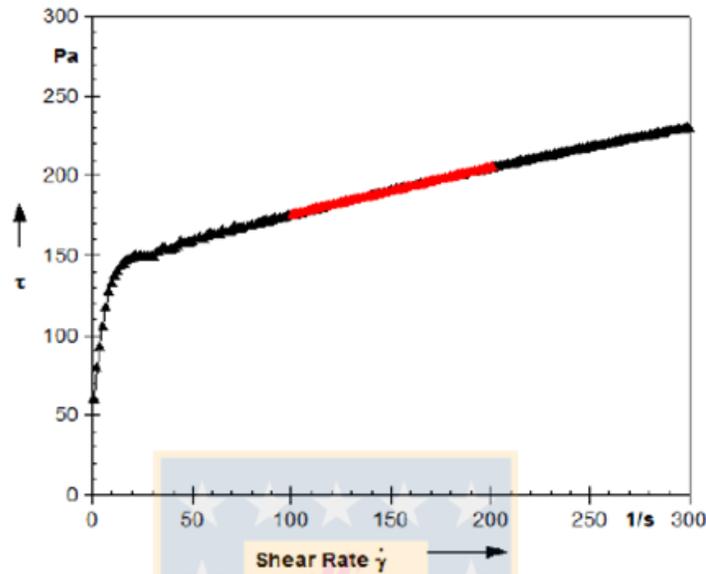


Figura 4: Reograma ajustado con modelo Bingham. Medición en negro y ajuste Bingham en rojo.  
Fuente: CIFUENTES 2016 [6]

El modelo señala que para velocidades de cizalle altas la viscosidad, correspondiente al cociente entre el esfuerzo y la velocidad de cizalle, se vuelve una constante. De esta manera el fluido puede ser modelado por una recta de ecuación:

$$\tau = \sigma_y + \eta_L * \dot{\gamma} \quad (3.3.1)$$

Donde  $\eta_L$ , correspondiente a la pendiente de la recta, define la viscosidad y la variable  $\sigma_y$ , que corresponde al coeficiente de posición de la recta, representara el yield stress de la pulpa.

Como alternativa al sensor convencional tenemos el sensor vane o sensor paleta que consta de un número fijo de láminas delgadas (entre 2 y 8) ubicadas en ángulos iguales alrededor de un pequeño eje cilíndrico. El método Vane se sustenta en el concepto de yield stress como una propiedad del material, asociada a los enlaces que forman la estructura de red continua que encontramos en suspensiones floculadas [5]. El principio es más sencillo que el utilizado en la

obtención de yield stress con sensor de copa. Se introduce la paleta en la suspensión para hacerla girar a una velocidad de rotación constante y muy pequeña mientras el equipo, a través de su sensor, mide el torque necesario para mantener la rotación del sensor a esa velocidad constante. El torque máximo corresponde al pick de la gráfica obtenida y se utiliza posteriormente en la obtención del yield stress.

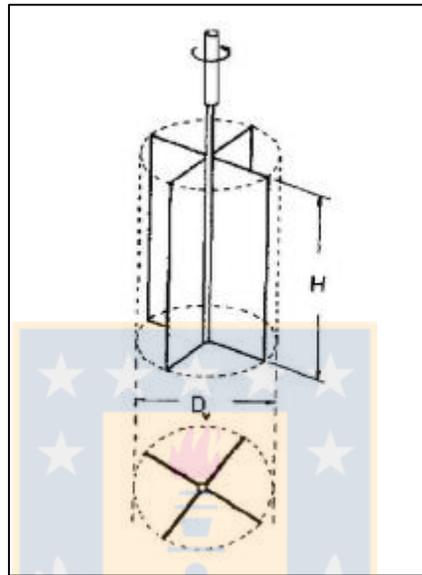


Figura 5: Esquema de una paleta de cuatro hojas Sensor Vane. Fuente: Dzuy and Boger [3]

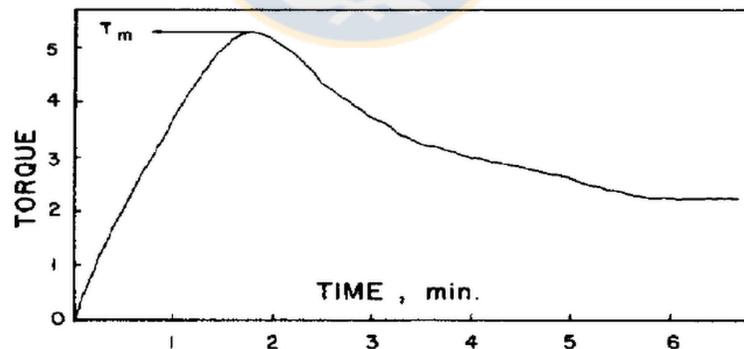


Figura 6: Grafico torque versus tiempo utilizando sensor Vane.

Para la obtención del yield stress es necesario hacer algunas suposiciones:

Se debe asumir la paleta como un cilindro y calcular el torque en el manto y en las caras inferior y superior según la ecuación:

$$T = (2\pi R_V H)\tau_w R_V + 2(2\pi \int_0^{R_V} \tau_e(r)r d_r r) \quad (3.3.2)$$

De los términos de la ecuación, el primero corresponde al torque generado por el manto del cilindro y el segundo a las caras inferior y superior. El término  $\tau_e(r)$  es desconocido pero se supondrá que el torque en las caras del cilindro varía de manera potencial según la ecuación:

$$\tau_e(r) = \left(\frac{r}{R_V}\right)^P \tau_w, \quad 0 \leq r \leq R_V, P \geq 0 \quad (3.3.3)$$

Con las condiciones de borde:

$$r = 0 \rightarrow \tau_e = 0$$

$$r = R_V \rightarrow \tau_e = \tau_w$$

Resolviendo la ecuación (3.3.2) considerando las acotaciones de (3.3.3) se obtiene la ecuación (3.3.4). Luego, acomodando términos se llega a la ecuación (3.3.5) desde la cual se obtendrá el valor del Yield Stress calculando la pendiente de la recta generada.

$$T_m = \frac{\pi D_v^3}{2} \left(\frac{H}{D_v} + \frac{1}{P+3}\right) \tau_y \quad (3.3.4)$$

$$\frac{2T_m}{\pi D_v^3} = \frac{H}{D_v} \tau_y + \frac{1}{P+3} \tau_y \quad (3.3.5)$$

La ecuación (3.3.5) toma en cuenta la relación potencial existente entre el esfuerzo de cizalle y el radio de la paleta. En donde se tiene que:

$T_m$  = Torque máximo.

$D_v$  = Diámetro de la paleta.

$H$  = Altura de la paleta.

$\tau_y$  = Yield Stress.

$P$  = Factor potencial

En anexo 1 se adjunta un ejemplo de estimación de yield stress utilizando este método.

### 3.4 Factores que influyen en la reología

Las variables de influencia en el yield stress son la concentración de sólidos, el tamaño y forma de partícula, pH y la naturaleza del material [7]. Considerando la temperatura como otra variable influyente, se estudiarán los efectos de:

- Concentración
- Granulometría
- pH
- Temperatura

#### 3.4.1 Concentración

Dentro de los factores más influyentes en la Reología está la concentración de la pulpa. Puede ser expresada en porcentaje en peso  $C_p$  o porcentaje volumen  $C_v$  donde:

$$C_p = \frac{m_s}{m_p} * 100, \quad C_v = \frac{V_s}{V_p} * 100 \quad (3.4.1.1)$$

Donde;

$m_s$  = Masa sólido

$m_p$  = Masa pulpa

$V_s$  = Volumen sólido

$V_p$  = Volumen pulpa

Los estudios señalan que a mayor concentración más le cuesta empezar a fluir a la pulpa, o sea que presenta un mayor yield stress. De forma similar, a medida que aumenta la concentración, se tiene como respuesta un aumento en la viscosidad. Esto se debe a que, en una pulpa diluida, la distancia entre las partículas es tan grande que casi no alcanza a haber interacción entre ellas. A concentración de sólidos altas, el movimiento de cualquier partícula

conduce al inmediato movimiento de las partículas más cercanas y el material tiende a comportarse como un sólido.

En la imagen se aprecia una relación común de la variable yield stress en función de la concentración.

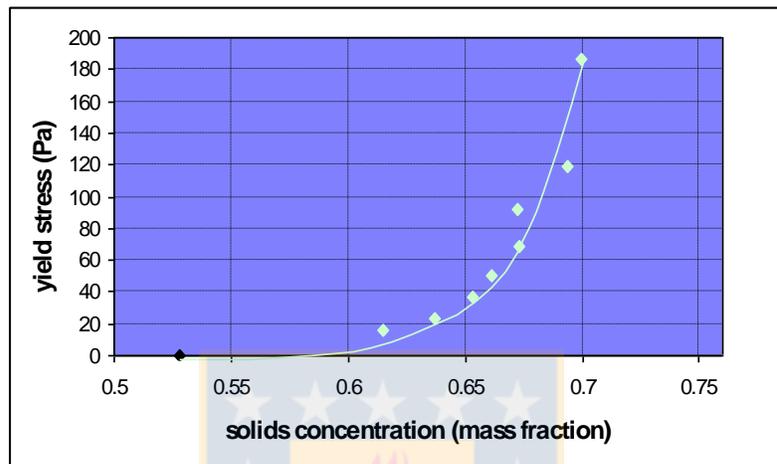


Figura 7: Respuesta típica de yield stress frente a cambios en la concentración. Fuente: BETANCOURT 2016 <sup>[8]</sup>.

### 3.4.2 Granulometría

Considerando la misma concentración de sólidos, si se compara la reología de una pulpa de granulometría gruesa versus una de granulometría fina, se observa un aumento en las propiedades reológicas en presencia de partículas finas. Como se puede apreciar en la figura 8, este efecto es válido tanto para la variable yield stress como la viscosidad.

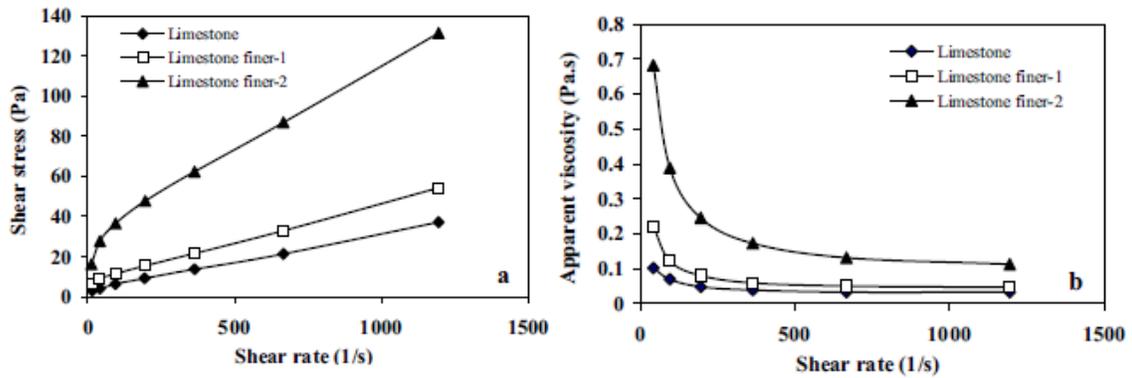


Figura 8: Efecto del tamaño de partícula en reología pulpas limonita. Fuente: MINGZHAO 2007<sup>[3]</sup>.

### 3.4.3 pH

El pH del medio juega un rol muy importante en minerales oxidados, especialmente en el punto isoeléctrico de la curva del potencial zeta, lugar de máxima formación de flóculos o agregados de partículas, gracias a las fuerzas de atracción de Van der Waals y a que la suspensión en ese punto desarrolla su máxima viscosidad <sup>[4]</sup>. La modificación de las propiedades de superficie de las partículas para estabilizar una suspensión puede obtenerse a través de varios mecanismos. Entre otros, la suspensión es estable en regiones donde las fuerzas repulsivas son mayores, por ejemplo, a valores de pH lejos del punto isoeléctrico.

### 3.4.4 Temperatura

En procesos de reducción de tamaño como la molienda o en transporte por tuberías, las pulpas minerales se ven sometidas a variaciones de temperatura lo que afecta directamente la reología. La figura 9 muestra la variación de la viscosidad de una pulpa de limonita en función de la temperatura.

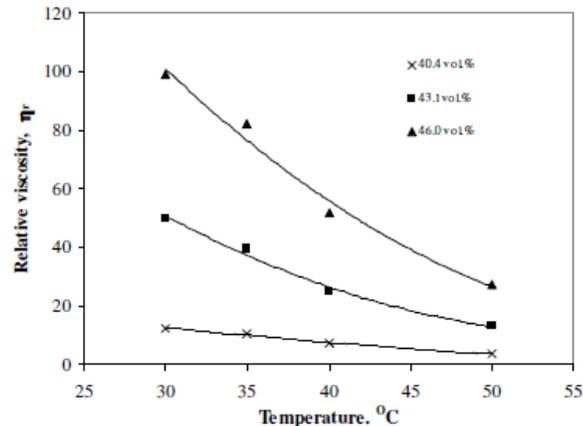


Figura 9: Efecto de la temperatura en la viscosidad relativa de pulpa de limonita. Fuente Senapati<sup>[9]</sup>

La disminución de la viscosidad a temperaturas elevadas está relacionada a un aumento en la energía cinética de las partículas lo que promueve la ruptura de los enlaces entre capas adyacentes, teniendo como resultado una disminución en la viscosidad de la pulpa <sup>[9]</sup>.

### 3.5 Cuarzo y química de superficies.

Luego del proceso de concentración, el elemento no magnético que pasa a constituir casi la totalidad del relave es el cuarzo, mineral de sílice (SiO<sub>2</sub>) muy común en la corteza terrestre.

Dentro de sus propiedades superficiales destacamos el potencial zeta que indica el signo de la carga eléctrica superficial de un mineral. Partículas con valores de potencial zeta opuesto tenderán a agregarse y aquellas de signo igual a repelerse <sup>[10]</sup>. El potencial zeta permite predecir el comportamiento coloidal de un sistema particulado, colectores catiónicos se adsorberán en partículas de potencial zeta negativo. El cuarzo, como se muestra en la figura 10, presenta un punto isoeléctrico en un pH cercano a 2,5. luego a medida que aumenta el pH su carga eléctrica se va haciendo cada vez más negativa.

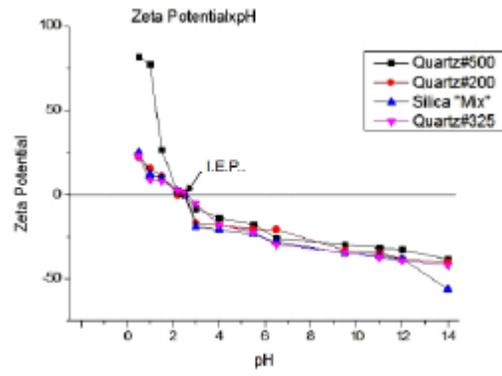


Figura 10: Potencial zeta del cuarzo en función del pH. Fuente: Júnior y Baldo, 2014 [11]



## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Diseño experimental

En la tabla 2 se muestran las 4 variables de estudio establecidas en el presente trabajo. Cabe mencionar que los valores de pH estudiados fueron elegidos en conjunto con personal de CAP que facilitó los valores más utilizados en el transporte de pulpa de relaves en otras faenas de la compañía. El floculante elegido fue el SNF 670 utilizado en los espesadores de relaves de PP con la dosificación señalada de 30 g/t.

Los valores de concentración de sólidos fueron definidos también con funcionarios de CAP quienes señalaron que los valores de yield stress más solicitados son los de pulpas entre el 40 y 60 %. En primera instancia se estableció como objetivo obtener pulpas de concentración de sólidos de 50, 55 y 60 % pero, debido a la alta incertidumbre de obtener pulpas con exactamente estos valores, se definieron las concentraciones de sólido como Bajo para el 49%, medio para el 55%, y alto para el 60%. Posterior a la prueba, todas las pulpas fueron llevadas a secado en hornos para corroborar la concentración de sólidos mediante el método del peso seco.

Tabla 2: Variables consideradas en diseño experimental

<b>Variables</b>	<b>Niveles</b>
Floculante SNF 670	Sin floculante y Con floculante 30 g/t
pH	Natural, 9 y 11
Concentración Sólidos % p/p	49, 55, 60
Tipo Relave	Procesamiento preconcentrado Básico-Sinter Feed

La variable floculante solo fue estudiada para la primera muestra M1. Los dos restantes se sometieron a medición solo bajo la condición pulpa floculada. Cabe señalar que en la primera

muestra sometida a medición aún no estaban definidos los tres valores de pH por lo que solo fue estudiada en los valores de pH natural y 9.

Con las consideraciones anteriores da como resultado 33 pruebas que, para asegurar la reproducibilidad, se realizaron en duplicado obteniéndose un total de 66 pruebas.

#### **4.2 Muestras y reactivos a utilizar.**

El material utilizado en las pruebas corresponde a pulpa de relaves obtenidas en distintas condiciones de operación.

La primera muestra M1 corresponde a una pulpa de relaves obtenida el 29 de octubre de 2018 cuando el preconcentrado que se estaba procesado corresponde a SINTER FEED de Alta ley. Se muestrearon 2800 L de pulpa al 2% de sólidos.

La segunda pulpa M2 corresponde a Relave obtenido durante el procesamiento de preconcentrado básico en muestreo realizado el 26 de noviembre. Tercera muestra M3 corresponde a relave obtenido el 10 de diciembre durante procesamiento de SINTER FEED de baja ley.

El floculante utilizado fue el SNF 670. Se utilizó como modificador de pH lechada de cal preparada a un porcentaje de sólido en peso de 10% con agua de proceso obtenida de los muestreos de las pulpas de relaves. El pH de las pulpas fue medido con pH metro Hanna HI98191

##### **4.2.1 Obtención muestras**

Las muestras se obtuvieron desde el cajón disipador (Dropbox A) ubicado antes del espesador de colas 3. Para la muestra 2 no fue posible la obtención desde el cajón disipador porque solo la línea 1 estaba procesando preconcentrado básico mientras las otras líneas seguían en condición normal de operación. Por lo que el muestreo se realizó en la descarga directa de relaves obtenidos desde la Línea 1.

Las figuras 11, 12 y 13 corresponde a muestreo industrial realizado en cajón disipador previo a espesador de colas 3.



Figura 11: Espesador de relaves 3. Planta de Pellets

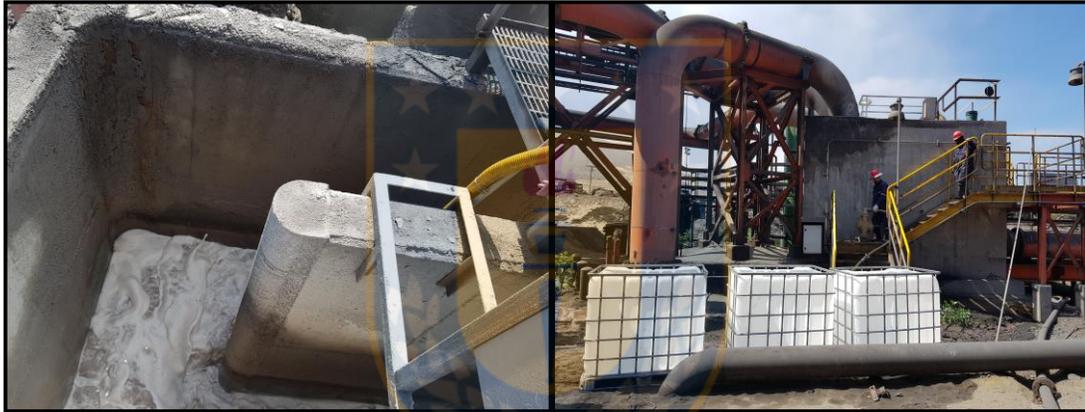


Figura 12: Cajón disipador previo a espesador de relaves 3. Planta de Pellets.



Figura 13: Isocontenedores con muestra de relaves. Planta de pellets.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio Metalúrgico ubicado en PP en 4 Iso-contenedores de capacidad 1 (m<sup>3</sup>).

#### 4.2.2 Caracterización muestras

Antes de efectuar la preparación de pulpas para las pruebas, se obtuvo una muestra representativa que se envió a los siguientes análisis:

##### 4.2.2.1 Análisis distribución de tamaño de partículas MASTERSIZER

La distribución de tamaño de las tres muestras se realizó con equipo MASTERSIZER ubicado en la sala de precisión del laboratorio de la unidad de INGENIERIA METALURGICA. Se realizó la medición por duplicado con los resultados mostrados en figuras 14,15 y 16. Además, con el objetivo de realizar una fácil comparación entre las muestras, se adjunta figura de las tres distribuciones de tamaño juntas más los valores de p80 y %-#325 en tabla 3.

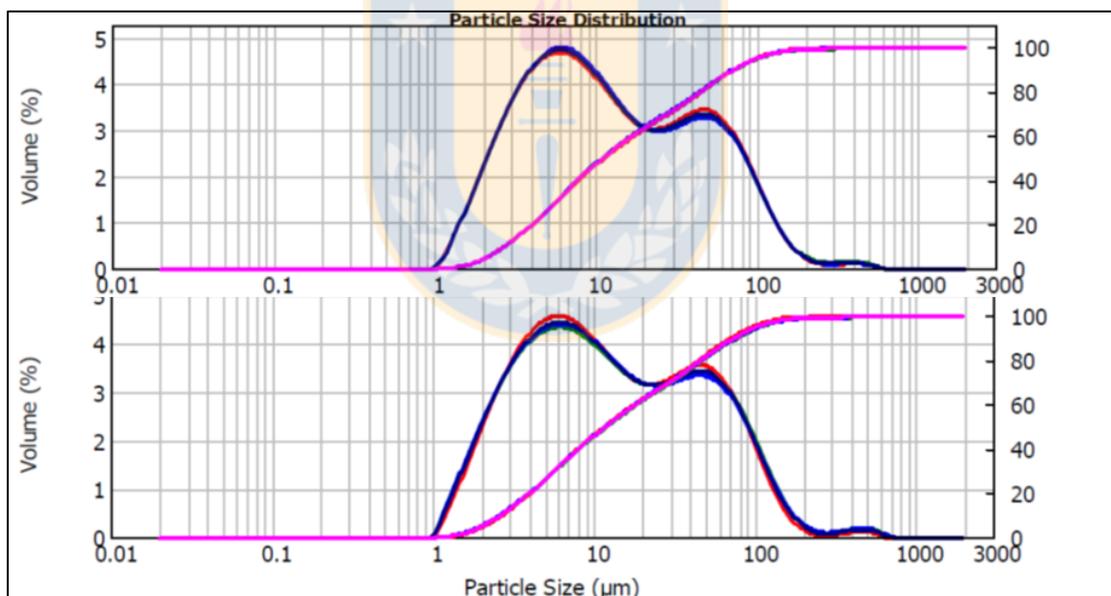


Figura 14: Análisis granulométrico en MASTERSIZER por duplicado muestra 1.

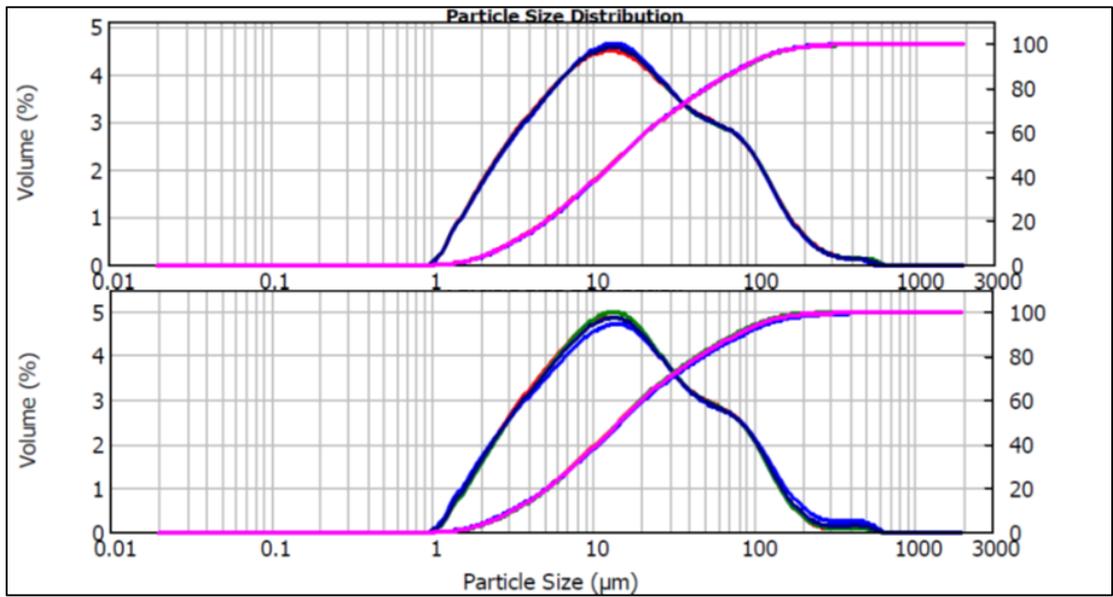


Figura 15: Análisis granulométrico en MASTERSIZER por duplicado muestra 2

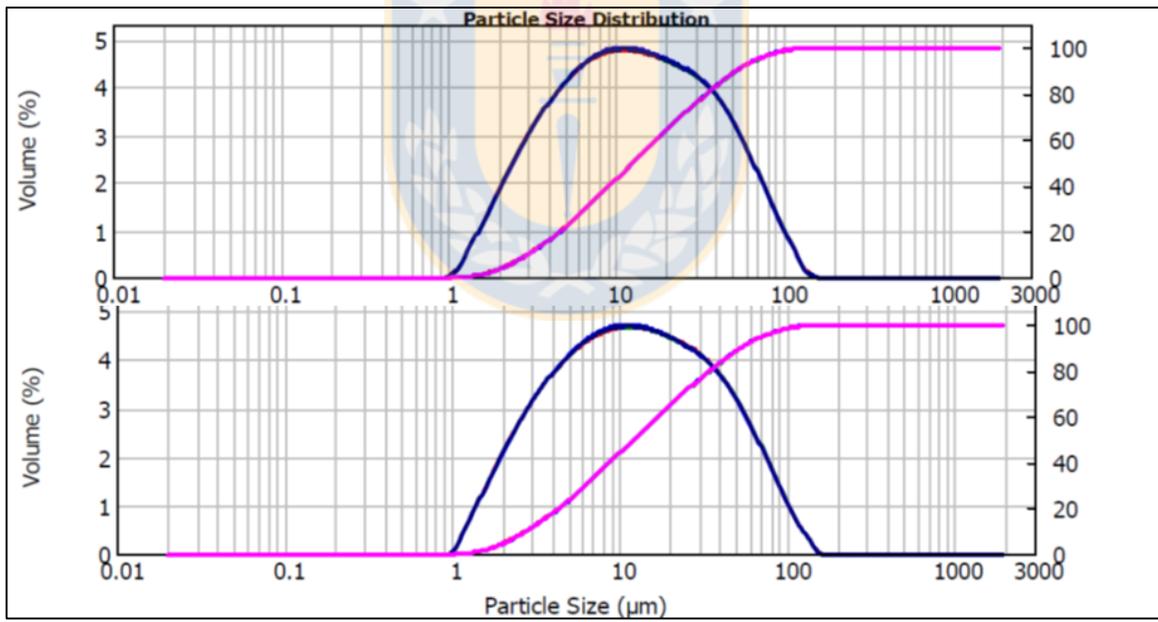


Figura 16: Análisis granulométrico en MASTERSIZER por duplicado muestra 3

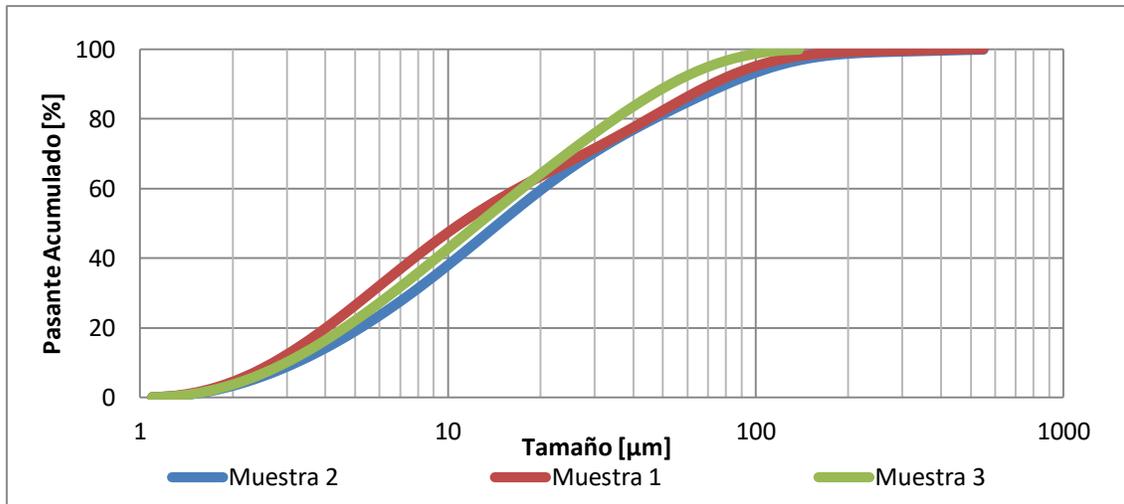


Figura 17: Granulometría muestras 1,2 y 3.

Tabla 3: Parámetros granulometría muestras 1,2 y 3

Muestra	$p_{80}$ [ $\mu\text{m}$ ]	%-#325
1	47.5	79.2
2	51.6	73.8
3	39.0	84.0

#### 4.2.2.2 Análisis químico por Fe

Todas las muestras fueron enviadas al laboratorio químico ubicado en planta de pellets para realizar análisis por Fe. Los resultados se muestran en la tabla adjunta:

Tabla 4: Caracterización por Ley Hierro muestras 1,2 y 3.

Relave	Ley Fe (%)
M1	7.40
M2	7.73
M3	6.70

#### 4.2.2.3 Ensayo Dtt para determinar Fe magnético

Independiente de la ley de Hierro que haya presente, para que pueda existir la concentración el mineral debe presentar propiedades magnéticas, por consiguiente, una variable de interés en la minería del hierro es el Fe magnético que presente cada muestra. En PP, esta propiedad se calcula a través del ensayo de tubo Davis con el que, simulando una etapa de concentración a pequeña escala, se logra cuantificar cuanto del material presente en la muestra presenta magnetismo. En Anexo se muestran las fórmulas utilizadas con esta metodología.

Tabla 5: Caracterización por Ley Hierro magnético muestras 1,2 y 3.

Relave	Ley Fe magnético (%)
M1	3.14
M2	4.07
M3	2.8

#### 4.2.2.4 Medición GER

Con el objetivo de conocer la gravedad específica del mineral, se enviaron las muestras a análisis de GER por picnometría. Los resultados se muestran en la tabla adjunta.

Tabla 6: Densidad del mineral muestras 1,2 y 3.

Relave	Densidad mineral(g/cm <sup>3</sup> )
M1	2.94
M2	2.78
M3	2.90

#### 4.2.2.5 Difracción Rayos X

Las muestras en estudio fueron llevadas a DRX (difracción de rayos x) a la Universidad de Atacama(UDA). Se determinó que las tres muestras tienen la misma mineralogía presentada en la siguiente tabla:

Tabla 7: Especies Mineralógicas

Especie Mineralógica	Fórmula Química
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{+2})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Calcita	$\text{CaCO}_3$
Chamosita(Clorita)	$(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Mg})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Cuarzo	$\text{SiO}_2$
Apatita	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3$
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Albita	$(\text{Na}, \text{Ca}) \text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$

En los resultados entregados por la UDA se menciona que al comparar los difractogramas cualitativamente, se observa que las muestras uno y tres, correspondiente a relaves obtenidos desde procesamiento de Sinter Feed, tienen una menor presencia de calcita que la muestra 2.

### 4.3 Equipos y procedimiento

#### 4.3.1 Preparación pulpa de relave a distinta concentración sólidos.

Dependiendo del sensor vane que se esté utilizando, el recipiente debe tener un mínimo de altura y diámetro. Considerando esto se eligió como recipiente un vaso precipitado de 2 litros. En Anexo 3 se presentan las condiciones de volumen mínimo que debe presentar el contenedor de la muestra.

La pulpa obtenida del muestreo industrial se dejó decantar por un periodo de 48 horas para luego quitar el máximo de agua sobrenadante posible. El sedimento restante era llevado a medición

de concentración de sólidos por peso seco. Conociendo la concentración de sólidos objetivo, inicial y el volumen de la pulpa, se calculó la cantidad de agua que se debió agregar o quitar a la pulpa para llegar a la concentración de sólido objetivo.

Respecto al floculante se comenzó se preparó una solución madre durante 1.5 horas de tiempo de acondicionamiento a concentración de 2.4 g/L. Luego se diluyó a 0.24 g/L para ser mezclado con la pulpa de relave. La cantidad de solución floculante diluida se agregó dependiendo de la cantidad de sólido presente en la pulpa, siempre con el objetivo de alcanzar la dosificación objetivo de 30 g/t. Luego del ajuste en la concentración de sólido, se agrega cal viva con jeringa directamente a la pulpa mientras se va controlando el pH de la misma utilizando peachimetro como se aprecia en la figura 18.



Figura 18: Medición pH de pulpa sometida a agitación

Con el objetivo de despreciar los efectos que la agitación pudiera tener en la medición de yield stress, todas las pulpas fueron sometidas a agitación de 700 rpm durante 6 minutos. El rpm fueron medidas con tacómetro disponible en el laboratorio metalúrgico.



Figura 19: Agitador mecánico y tacómetro medición rpm

Luego de realizar la medición de yield stress, todas las pruebas fueron enviadas a secado para corroborar la concentración de sólidos utilizando el método del peso seco

#### 4.3.2 Pruebas para determinación yield stress.

La medición de yield stress se realizó con el viscosímetro rotacional Hakke VT550 ubicado en la sala de precisión del laboratorio de la unidad Ingeniería Metalúrgica como se aprecia en la figura 20.



Figura 20: Viscosímetro Hakke VT550 Sala de precisión laboratorio de Ingeniería Metalúrgica

Los sensores utilizados en la medición fueron el Vane FL-10 y Vane FL-100. En la tabla 8 se muestran las dimensiones de cada paleta y se adjunta imagen de los sensores utilizados.

Tabla 8: Dimensiones y nombre de las paletas

Paleta	Altura (cm)	Diámetro (cm)
FL-10	6	4
FL-100	1.6	2.2



Figura 21: Sensor Vane FL-10 y FL-100

El primer objetivo específico fue la puesta en marcha del viscosímetro para medición con sensor Vane. Para esto se generó un procedimiento con parámetros utilizados en el departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción. Los pasos para realizar la medición son:

1. Encender computador, abrir software REOWIN JOB MANAGER y seleccionar el programa de trabajo. Fijar los parámetros de velocidad de cizalle en  $\dot{\gamma}=0.3 \left[\frac{1}{s}\right]$ , duración de 20 segundos y 150 puntos de medición que serán registrados.

2. Seleccionar el sistema de Paleta FL-10, FL-100 según corresponda.
3. Sumergir la paleta en el sedimento, dejándola centrada respecto del diámetro y de la altura.
4. Iniciar la medición, esperar los 20 segundos y guardar datos prueba.
5. Apagar equipo, remover y limpiar la paleta, volver a encender el computador y seguir con la siguiente medición según procedimiento 2.
6. Con el programa REOWIN DATA MANAGER ver resultados obtenidos de torque máximo correspondiente a la medición realizada por cada paleta.
7. Con las dimensiones de la paleta y el torque máximo mostrado en la curva de torque vs tiempo, se utilizará el método vane para obtener valor de yield stress.
8. Enviar una muestra de la pulpa a ensayo de concentración de sólidos mediante secado, el Cp de la muestra corresponderá al valor de yield stress obtenido.

#### 4.3.3 Estimación concentración de sólido de la pulpa

Posterior a la medición con viscosímetro, se corrobora el valor de la concentración de sólidos para todas las pulpas del estudio. Para esto cada muestra fue trasvasijada a bandejas, de peso conocido, que fueron enviadas a secado en hornos ubicados en el laboratorio de la unidad metalúrgica. Con el peso de la bandeja vacía más el peso de la bandeja con la pulpa se procedió a calcular el peso de la muestra según la ecuación (4.3.3.1):

$$m_p = m_{b2} - m_{b0} \quad (4.3.3.1)$$

Donde:

$m_p$  = masa pulpa

$m_{b2}$  = masa bandeja muestra pulpa

$m_{b0}$  = masa bandeja vacía

Luego de pasar 24 horas, las bandejas fueron sacadas del horno y pesadas nuevamente. La masa de sólido se estimó según la ecuación (4.3.3.2).

$$m_s = m_{b1} - m_{b0} \quad (4.3.3.2)$$

Donde:

$m_s = \text{masa sólido}$

$m_{b1} = \text{masa bandeja muestra seca}$

Finalmente, la concentración de sólido se calculó según la ecuación (4.3.3.3):

$$\%W = \frac{m_s}{m_p} \quad (4.3.3.4)$$



## 5 Resultados y discusiones.

En este capítulo se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas a las tres muestras en estudio.

La interpretación se realizará estudiando el efecto concentración de sólidos, pH, y floculante en la variable yield stress y se finaliza con la comparación entre los valores obtenidos de las tres muestras en estudio.

### 5.1 Efecto concentración de sólidos y pH.

En las figuras 22, 23, 24 y 25 se muestran las curvas de yield stress en función de la concentración de sólidos de las tres muestras en estudio.

Considerando solo el efecto de la concentración de la pulpa, para todos los casos se aprecia un aumento de la variable yield stress cuando la concentración es mayor. Esta respuesta tiende a ser de forma exponencial.

Respecto al pH, los mayores valores de yield stress se obtuvieron a pH 11, seguido por las curvas a pH 9 y obteniéndose los valores más bajos a pH natural. A modo de ejemplo, y considerando valores importantes en el diseño de transporte de pulpas de relave por tuberías, analizaremos la concentración de sólidos la pulpa alcanza los 100 [Pa]. De la Figura 22 se aprecia que, a pH natural la pulpa alcanza los 100 [Pa] a una concentración de sólidos del 62%, bajando a 61% para la pulpa a pH 9 y por bajo el 57% para la pulpa a pH 11. De forma similar los 20 [Pa] son alcanzados a una concentración de 52% a pH natural, 51% a pH 9 y bajo el 49% para pH 11.

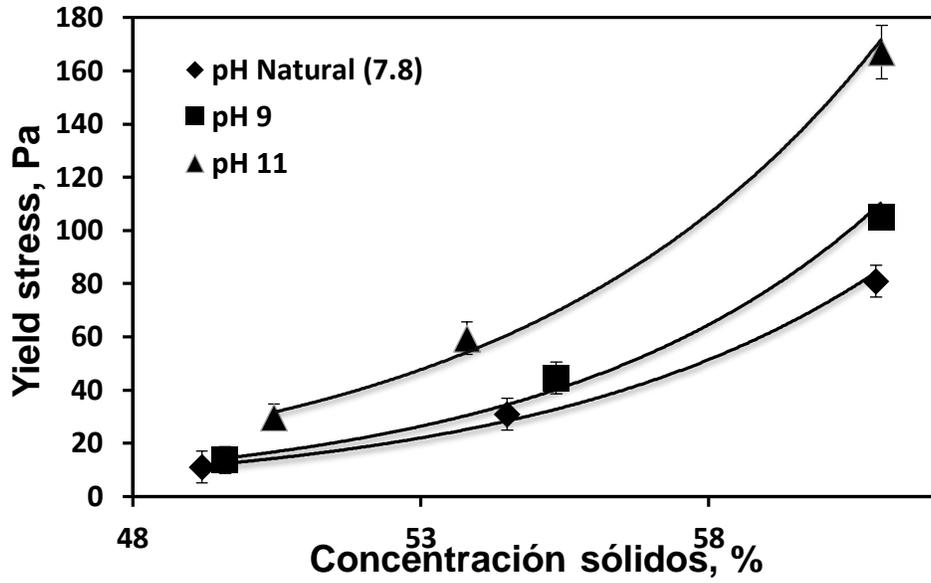


Figura 22: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 1 sin floculante a pH natural, 9 y 11.

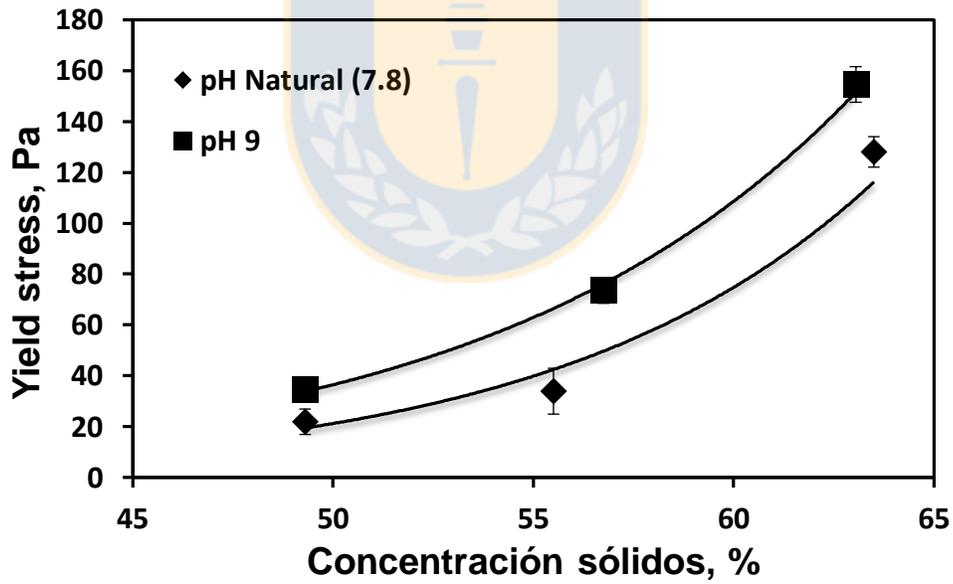


Figura 23: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 1 con floculante a pH natural y 9.

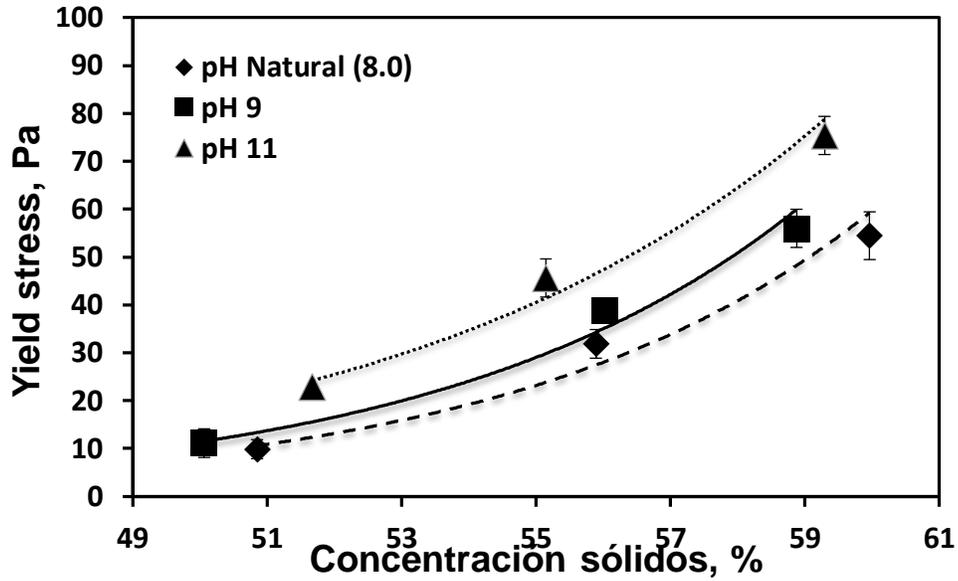


Figura 24: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 2 con flocculante a pH natural, 9 y 11.

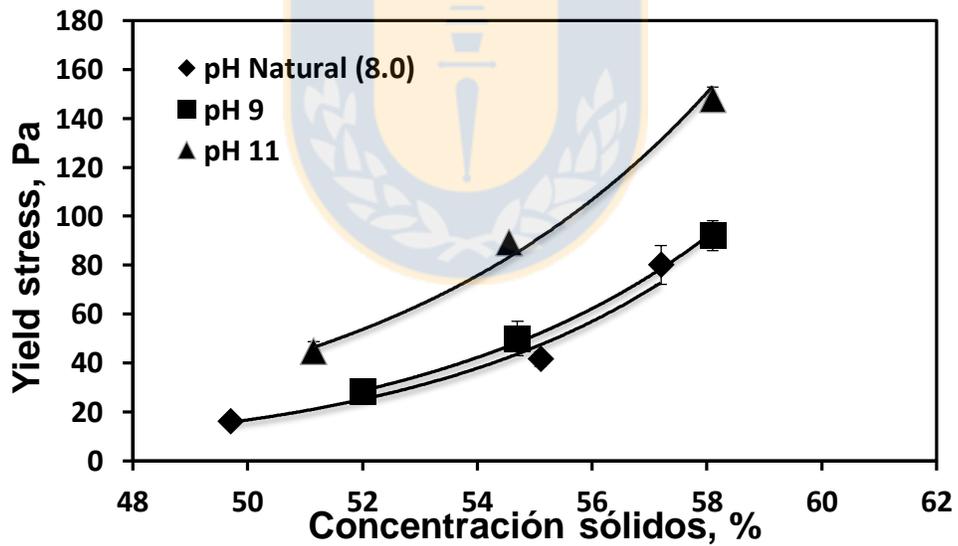


Figura 25: Yield stress en función de la concentración de sólidos para muestra 3 sin flocculante a pH natural, 9 y 11.

Como se menciona en el capítulo 3, el punto isoeléctrico de la sílice se encuentra entre pH 2 y 4, por lo que se esperaría que un aumento de la variable pH tendría como consecuencia una disminución en el Yield stress de la pulpa. Sin embargo, estudios señalan que un aumento de pH

utilizando Cal entrega condiciones de mejor floculación a través de estructuras de red más fuertes, debido a la presencia de iones calcio que influirían directamente en el mecanismo de floculación. En la figura 24 se muestra la coagulación de una suspensión de cuarzo en función del pH en presencia de iones calcio.

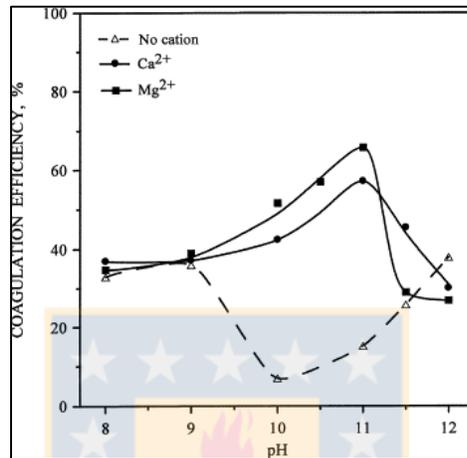


Figura 26: Eficiencia de coagulación de partículas de cuarzo en función del pH y en presencia de iones calcio y magnesio. Fuente: Ozkan, Ucbeyiy, Duzyol 2008.

Como se aprecia en la figura 26, los valores de eficiencia de coagulación obtenidos sin presencia de cationes disminuyen a un valor mínimo a pH 10 causado por el aumento de la carga superficial negativa del cuarzo a medida que aumenta el pH. Sin embargo, cuando existe presencia de iones de calcio, un aumento en el pH tiene como respuesta un incremento en la eficiencia de coagulación alcanzando los valores máximos a pH 11 [12].

## 5.2 Efecto floculante.

En las figuras 27 y 28, se muestran las curvas de yield stress en función de la concentración de sólidos para las pulpas en condición floculada y no floculada. En ambas gráficas se aprecia que, existe un efecto del floculante sobre la pulpa que hace aumentar el valor del yield stress tanto a pH natural como a pH 9.

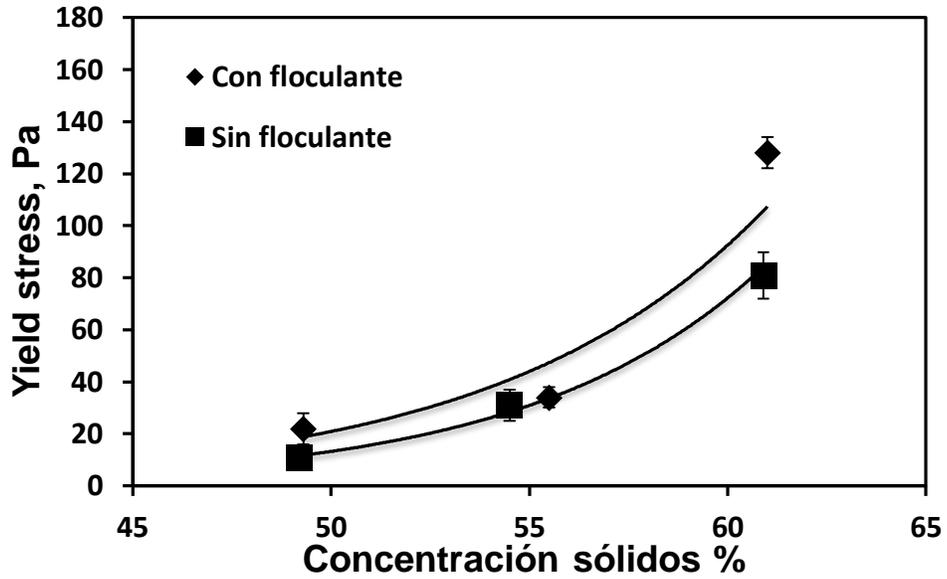


Figura 27: Yield stress en función de la concentración de sólidos para pulpa floculada y no floculada a pH natural.

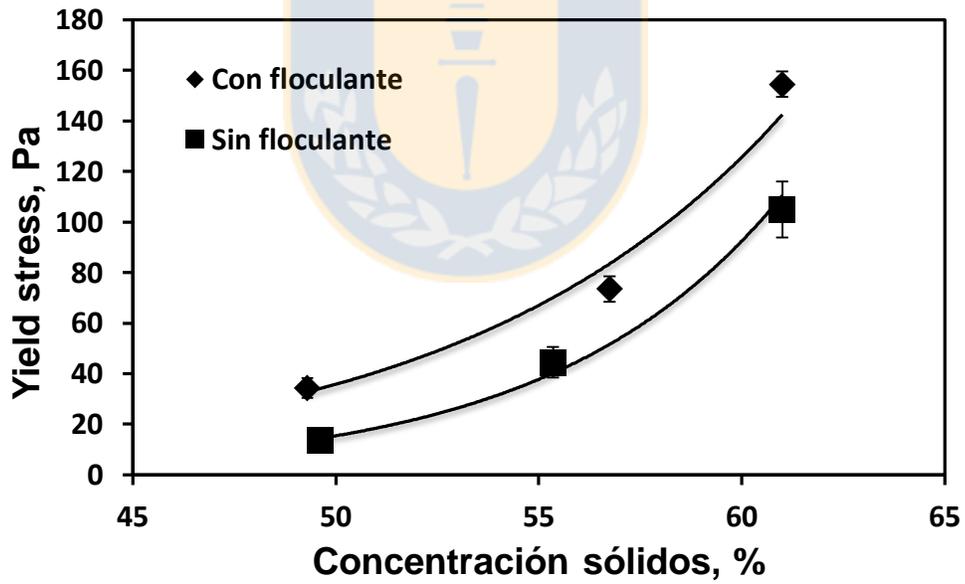


Figura 28: Yield stress en función de la concentración de sólidos para pulpa floculada y no floculada a pH 9.

### 5.3 Comparación Yield stress muestras distinta condición procesamiento.

En las figuras 29, 30 y 31 se muestran los yield stress obtenidos de las tres muestras para pulpa en condición floculada y a pH 11, 9 y natural. Los resultados muestran que existen mayores valores de Yield stress para muestras 1 y 3. Esto se aprecia en condición de pH natural, 9 y 11.

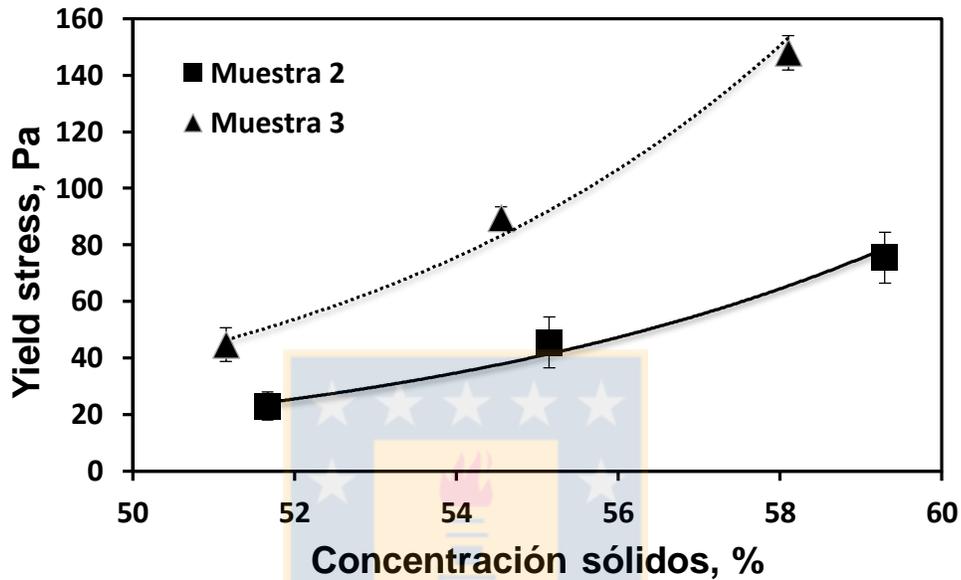


Figura 29: Yield Stress en función de la concentración de sólidos muestras 2 y 3 a pH 11

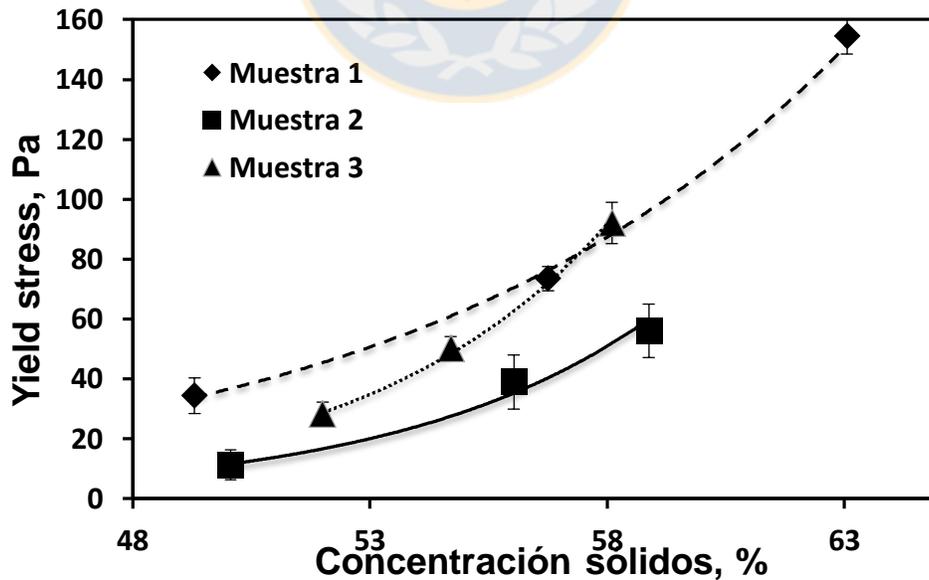


Figura 30: Yield Stress en función de la concentración de sólidos muestras 1, 2 y 3 a pH 9

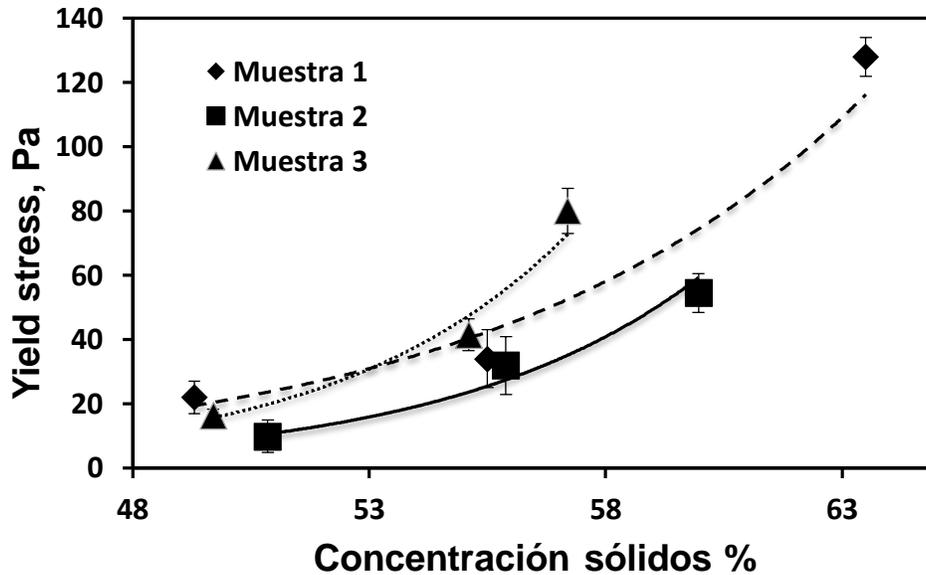


Figura 31: Yield stress en función de la concentración de sólidos muestras 1, 2 y 3 a pH Natural

En la tabla 2 adjunta se presenta un resumen de las características de cada muestra donde se ve que la muestra 2, correspondiente a relave obtenido desde procesamiento de preconcentrado básico, presenta la granulometría más gruesa con un  $p_{80}$  de 51,6  $\mu\text{m}$  sobre las muestras 1 y 3 con un  $p_{80}$  de 47,5 y 39  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Esta diferencia en los valores de yield stress estaría explicada por la mayor presencia de partículas finas de las muestras 1 y 3 por sobre la muestra 2.

Tabla 9: Resumen caracterización muestras 1,2 y 3.

Muestra Relave	Ley Fe, %	Ley Fe mag. %	GER	% -#325	$p_{80}$ $\mu\text{m}$
M1	7.5	3.1	2.9	79.2	47.5
M2	7.7	4.1	2.8	73.8	51.6
M3	6.7	2.8	2.9	84.0	39.0

## 6 Conclusiones y recomendaciones.

A continuación, se muestran las conclusiones más importantes del presente estudio:

- Se realizó la puesta en marcha del viscosímetro rotacional Hakke VT-550 con sensor paleta y se generaron procedimientos para obtención del yield stress utilizando el método Vane.
- Para las tres muestras en estudio y en todas las condiciones de pH que se realizaron mediciones, la concentración de sólidos tuvo un efecto directo en la variable Yield Stress. Se observó que un aumento en la concentración de la pulpa tiene como respuesta un aumento en el yield stress de la pulpa. Esta respuesta tiende a ser de la forma exponencial.
- En todas las muestras en estudio, con la pulpa floculada y no floculada, a pH 11 se obtuvieron los mayores valores de yield stress, seguido por la pulpa a pH 9 y finalizando con los valores más bajos a pH natural.
- Para la muestra 1, se observaron mayores valores de yield stress de la pulpa con floculante. Este efecto se aprecia en las tres concentraciones de sólidos medidas y tanto a pH 9 como pH natural.
- Al comparar los resultados de las tres muestras en estudio, se observa que las muestras 1 y 3, correspondiente a relaves obtenidos desde el procesamiento de Sinter Feed, presentan valores de Yield Stress mayores que la muestra 2, correspondiente a relave obtenido desde el procesamiento de preconcentrado básico. Esta diferencia se explicaría por el mayor tamaño de partícula, cuantificado con la variable  $p_{80}$  Y  $\% -\#325$ , que presenta la muestra 2 en comparación con las muestras 1 y 3.

Como se mencionó en los antecedentes de la empresa, CAP Minería está desarrollando el proyecto relaves a tierras el que contempla transportar a futuro todos los Relaves que se produzcan en planta de pellets. Dicho esto, se recomienda:

- ✓ Realizar las mismas pruebas experimentales a una muestra de relave obtenido desde procesamiento de preconcentrado RD, que no fue posible obtener en este estudio, y así realizar una comparación entre los yield stress de todas las posibles pulpas de relaves que se transportaran a futuro en Planta de Pellets.

- ✓ Realizar seguimiento al proyecto relaves a tierra para cuando se definan los valores de concentración de pulpa a la que se transportaran los relaves, realizar pruebas a esa concentración en un mayor rango de pH.
- ✓ Generar base de datos para a futuro llegar a realizar modelos que permitan predecir el comportamiento reológico de la pulpa frente a cambios en granulometría, concentración de solidos o material procesado.



## Bibliografía

- [1] JRI. 2011. Informe Final Reología y Sedimentación Pulpas CAP HUASCO. Consultoría para diseño de transporte de pulpas de Relave. CAP MINERIA, Planta de pellets Huasco.
- [2] CABREJOS SALINAS, Juan Alberto. Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de agua a partir de relaves de gran minería de cobre mediante la tecnología de relaves espesados. 2011.
- [3] HE, Mingzhao. *Slurry rheology of industrial minerals and its effects on wet ultra-fine grinding*. 2007. Tesis Doctoral. Luleå tekniska universitet.
- [4] HE, Mingzhao; WANG, Yanmin; FORSSBERG, Eric. Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review. *Powder Technology*, 2004, vol. 147, no 1, p. 94-112.
- [5] DZUY, Nguyen Quoc; BOGER, David V. Yield stress measurement for concentrated suspensions. *Journal of Rheology*, 1983, vol. 27, no 4, p. 321-349.
- [6] CIFUENTES, Merrill; NICOLÁS, Javier. Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada. 2016
- [7] ALEJO, Bonifacio; BARRIENTOS, Arturo. Model for yield stress of quartz pulps and copper tailings. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, vol. 93, no 3-4, p. 213-219.
- [8] BETANCOURT, Fernando. Materia asignatura espesamiento y filtración. Universidad de Concepción, Departamento Ingeniería Metalúrgica, 2016.
- [9] SENAPATI, Pradipta Kumar; PANDA, Dibakar; PARIDA, Ashutosh. Predicting viscosity of limestone–water slurry. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2009, vol. 8, no 03, p. 203.
- [10] GUTIERREZ, Leopoldo. Materia asignatura Flotación, Universidad de Concepción, Departamento Ingeniería Metalúrgica, 2017.
- [11] JUNIOR, BAPTISTA, José, Joao. The Behavior of Zeta Potential of Silica Suspensions. Brasil, Sao Carlos: Scientific Research. 2014.
- [12] OZKAN, Alper; UCBEYIAY, Havvanur; DUZYOL, Selma. Comparison of stages in oil agglomeration process of quartz with sodium oleate in the presence of Ca (II) and Mg (II) ions. *Journal of colloid and interface science*, 2009, vol. 329, no 1, p. 81-88.

## ANEXOS

### Anexo 1: Ejemplo de cálculo de yield stress con método vane.

El método utilizado en la obtención de yield stress fue mediante el método vane. En primer lugar, los resultados de la medición son entregados en gráficos de torque vs tiempo como se muestra en la figura 32.

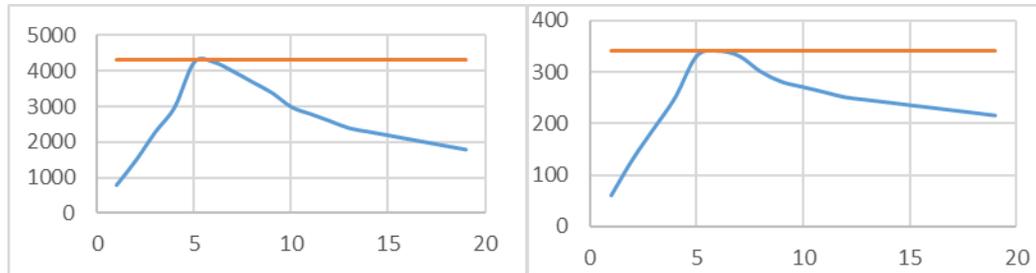


Figura 32: Curva Torque máximo utilizando método vane

En el ejemplo se utilizarán los torques entregados en la figura que corresponden a:

- $4260 * 10^{-6}$  Nm, entregado por sensor FL-10
- $340 * 10^{-6}$  Nm, entregado por sensor FL-100

Como se menciona en el capítulo 3.3, los valores de torque máximo y las dimensiones de los sensores son necesarios para el posterior cálculo de Yield Stress, el cual estará dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{2T_m}{\pi D_v^3} = \frac{H}{D_v} \tau_y + \frac{1}{P + 3} \tau_y$$

Para paletas con un diámetro finito, como es el caso de los sensores utilizados en esta memoria, los valores de yield stress obtenidos con este método tendrán inevitablemente errores asociados. Este error debe ser estimado con técnicas empíricas utilizando paletas de mismo largo y diferente diámetro. Sin embargo, debido a la limitación de sensores con las características señaladas, se asumió una relación lineal del esfuerzo en las caras del cilindro, asumiéndose el factor potencial P como 1.

Con las dimensiones de las paletas conocidas, y utilizando los valores de torque máximo obtenido desde la gráfica torque versus tiempo, el yield stress desde la grafica  $2T_m/\pi D_v^3$  vs  $(\frac{H}{D} + \frac{1}{4})$ . En la figura 33 adjunta, el valor del yield stress, correspondiente a la pendiente de la recta, fue de 28,5.

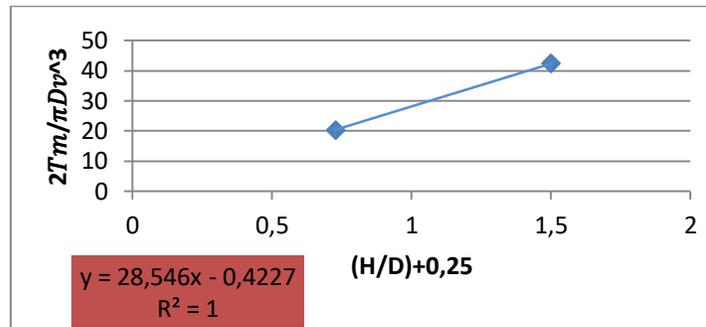


Figura 33: Ejemplo estimación yield stress con metodo vane



## Anexo 2: Estimación Fe magnético con ensayo de tubo Davis DTT.

En primer lugar, la muestra en estudio es sometida a una concentración magnética de 4000 Gauss donde se produce una corriente de concentrado tubo Davis CDTT y una segunda de colas CDTT.

Luego se procede a calcular la recuperación  $R_{pDTT}$  según la expresión:

$$R_{pDTT} = \frac{\text{PesoConcentrado}}{\text{Pesomuestra}} \cdot 100$$

Las muestras del DTT se llevan a análisis químico por Fe para posteriormente calcular el Fe magnético según:

$$Fe_{mag} = \frac{R_{pDTT} \cdot Fe_{DTT}}{100}$$

Donde  $R_{pDTT}$ = Recuperación en peso de la prueba de Tubo Davis.

$Fe_{DTT}$ = Ley de Fe del concentrado DTT

### Anexo 3: Dimensiones recipiente para prueba con sensor Vane.

La muestra utilizada en la prueba tiene que estar en un recipiente lo suficientemente grande para evitar interferencias entre las paredes del contenedor y el sensor. Los tamaños recomendados se aprecian en la figura 34:

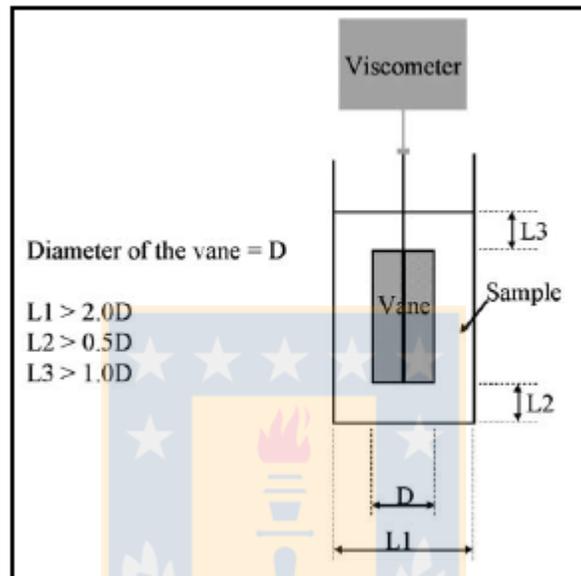


Figura 34: Dimensiones recipiente para medición Sensor Vane

Considerando que el sensor Vane FL-10 tiene un altura y diámetro de 6 y 4 cm respectivamente, se debe considerar un recipiente de altura sobre los 15 (cm) y diámetro mayor a los 8 (cm).