UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO - CHILE

ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO DE RELAVES ANTE VARIACIONES DE CIZALLE.

Memoria de Titulación presentada por

JUAN FRANCISCO SEPÚLVEDA PÉREZ

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
SEBASTIÁN RAYO VILLANUEVA

Profesor Co-referente
VIVIAN ARANDA NÚÑEZ

Enero de 2018

1. Agradecimientos

'It is a capital mistake to theorize before one has data. Insensibly one begins to twist facts to suit theories, instead of theories to suit facts.

Arthur Conan Doyle

Πάντα ρεῖ. Todo fluye.

Heráclito

Este material les va a encantar.

Iván Arenas

Sin duda si tuviera que agradecer a todos los que me han ayudado en esta travesía que comenzó 12 años atrás, mamotreto sería el sustantivo ad-hoc para definir en lo que se transformaría esta memoria, así que haciendo uso del poder de síntesis de mis 594 puntos en la PSU de lenguaje, comenzaré por el principio:

En mi paso por campus Vitacura agradecer al profesor Bahamondes por su filosofía entregada, sus alegorías y metáforas para enseñar matemática. A Jordana por todo el cariño de ese año que compartimos clases, o cuando me acompañabas a comer los sándwich vegetarianos al casino.

A Marcos Lozano, porque fue el primero que creyó en mí, cuando un día llegué a tocar la puerta de federación. Eres hasta el día de hoy, un ejemplo a seguir.

En mi paso por Casa Central, agradecer a Cristobal "Membruanas" Téllez, por ayudarme a entender las tablas de vapor, por enseñarme como sacar fotos, invitarme a viajar y aconsejarme sobre la vida.

Al profesor Arrieta, que su forma de enseñar la física me hacía soñar como un niño que le enseñan del universo por primera vez. Al profesor Yansen, por lograr que entendiera y pasara Mate3 y 4. Gracias.

Al francés, con sus chili con carne, pizzas, lasañas, musakas y ratatouille que alimentaban el cuerpo y el alma.

Al profesor Galindo, por sus historias y consejos de vida que amenizaban las clases.

A los 3x1000, al XL, a la noni, a la tia juanita, al maestro, a las panaderías de placeres que con sus alimentos cocinados en el mejor aceite de motor, paleaban el hambre estudiantil.

Agradecer al wata por ser la sede oficial de las juntas de estudio, por acogerme en su sofá cuando no tenía donde dormir. Siempre había techo y comida en el 309 sin pedir nada a cambio, gracias. Agradecer al Cepe, por su apoyo en todo momento que lo necesité, por su generosidad en entregar amistad y compañía. Al nano, por el apoyo en FIO, hidrología, hidráulica aplicada, máquinas y proyecto hidráulico. Al Charly Wolf, por escuchar mis locuras y darme ánimo en momentos difíciles. Al Pancho Diaz, que aunque se haga el duro, fuiste siempre un 100 conmigo y nunca me dejaste de apoyar, tienes un corazón gigante. Al rambomen, por apañar a cuanta aventura se me ocurría, por contagiar alegría y optimismo, gracias. A todos mis compañeros de la USM, con los que compartí aunque fuera un ramo, quiero que sepan que fueron significativos. Gracias.

Agradecer a mis amigos del colegio, al Mono, al Tata, al Giova y el Gestos. Me sentí apoyado en todo momento por ustedes aún en la distancia. Gracias por esos carecas, wololo, oro por favor y milanesas, por darme ánimo, y sobretodo, gracias, gracias por creer en mí.

A la Cony Retamal, por su amistad constante y presente, su cariño incondicional en momentos difíciles y por su corazón enorme. Gracias.

Agradecer a la Jade, Flora y Alondra, que en mi regazo acompañaban las horas de estudio, que ladrando o moviendo la cola, hacían más llevaderas las jornadas.

A la Dianisin, por los panoramas que armamos siempre, las salidas gastronómicas y culturales, por las eternas conversaciones y cariño en abundancia. Gracias

A la Pepa, por aterrizarme cuando lo necesitaba, por alimentarme, escucharme y contenerme. Gracias.

A mi hermana querida, por cocinarme tantas cosas deliciosas y con tanto cariño. Nadie cocina como tú.

Al mejor primo de todos, duque de Quillota, conde de las parrillas: Cristián, por las invitaciones a su feudo, las salidas en auto a repartir tofu, por enseñarme tanto de mecánica y autos, por el apoyo en esta etapa universitaria. Gracias.

A todos mis compañeros de oficina, a Felipe Parga, a Raul, a Maryelen, a Sofi, a Marité, a Felipe García, a Christian, a Manuel, a Diego, a Kathy, a Juan y por supuesto a Pablo Vivero.

A mis compañeros del Laboratorio, por enseñarme a usar los equipos y no incendiar el edificio (aunque casi casi): Rómulo y Waldo.

Agradecer a la profe Vivian, por la calidez y entusiasmo que entregó en cada reunión de desarrollo de esta tesis, motivándome incluso a presentar en mi primer congreso. Gracias.

Agradecer muy especialmente a Sebastián Rayo, por arriesgarse y confiar en mí, gracias por la oportunidad. Gracias por la humanidad y bondad del trato hacia mí. Gracias por ser un ejemplo a seguir.

Y por último, y más importante, agradecer a Cony. Sin ella no lo hubiera logrado.

2. Dedicatoria

A mi madre, por su entrega infinita, contención incansable y crianza amorosa.

A mi abuelo, porque de él aprendí el gusto por la ciencia y los mecanismos de la vida.

A Constanza, por todo el apoyo, paciencia y amor entregado durante esta etapa.

Al cepe, al wata y al nano, que se transformaron en mi familia en mi paso por Valparaíso.

3. Índice

1. Agradecimientos 2
2. Dedicatoria 5
3. Índice 6
4. Introducción 9
5. Objetivos 21
6. Revisión Bibliográfica 22
6.1. Historia del transporte hidráulico en minería 22
6.2. Escasez del Recurso Hídrico 24
6.3. Situación de los Relaves en Chile 26
6.4. Reología y Granulometría 30
6.5. Modelos Reológicos 34
6.6. Reología de Relaves 35
6.7. Reología Experimental 39
6.8. Tixotropía 43
7. Primer Ensayo Exploratorio. 47
7.1. Objetivos 47
7.2. Granulometría 47
7.3. Densidad de Solidos 48
7.4. Concentración de Sólidos 48

7.5. pH 49

7.6. Procedimiento 49

7.7. Resultados: 51

7.8. Análisis de errores en Ensayo Exploratorio 1 52

7.8.1. Objetivos 52

7.8.2. Procedimiento 53

7.8.3. Resultados 56

8. Segundo Ensayo Exploratorio 58

8.1. Preparación de muestras. 58

8.2. Ensayo 59

8.3. Parámetros a medir 60

8.4. M7 61

8.5. M8 62

8.6. Resumen resultados muestras M7 y M8 64

8.7. Análisis de los datos 65

9. Propuesta de nuevo método 67

9.1. Pruebas sin floculante 68

9.1.1. Sensor Helicoidal 68

9.2. Pruebas con floculante 70

9.2.1. Sensor Vane 71

9.2.2. Sensor Helicoidal 72

9.2.3. Comparación de Métodos: Vane y Helicoidal 73

10. Ensayo definitivo con nuevo método. 74

10.1. Granulometría 76

10.2. pH 77

10.3. Resultados 78

11. Conclusiones 80

12. Bibliografía 84

4. Índice de Figuras

Figura 1- Distribución de los usos consuntivos del agua a nivel regional. Zona Norte. Fuente: Atlas del Agua en Chile, DGA. 2016 15

Figura 2 - Consumo de agua continental en minería según fuente el año 2016. Fuente: Cochilco 2016 16

Figura 3 - Consumo de agua continental en minería el año 2016. Fuente: Cochilco 2016 17

Figura 4 - Distribución Porcentual de las Aguas Según Proceso Minero el año 2016. Fuente: Cochilco 2016 17

Figura 5 - Uso de Agua de mar en la minería del cobre 2010-2016. Fuente: Cochilco 2016 18

Figura 6 - Espesadores MLP 19

Figura 7 - Fiebre del Oro en California. 1858. Fuente: uintahbasintah.org 22

Figura 8 - Sewell 1920 Fuente: memoriachilena.cl 23

Figura 9 - Canaleta Madera Operativa. Año 2012. Sewell. Fuente: Archivo Fotográfico JRI 23

Figura 10 - Trazado Ex Mineroducto 20'' Ex Minera Disputada. Actual Acuedcuto. Google Earth. 24

Figura 11 - Consumo esperado de agua total en la minería del cobre 2014-2025 (m3/seg). Fuente: Cochilco 2016 25

Figura 12 - Consumo esperado de agua total en la minería del cobre por región 2014-2025 [m^3/seg]. Fuente: Cochilco 2016 26

Figura 13 - Millones de Toneladas de Mineral Procesado Según Tipo de Mineral. Fuente: Cochilco 2016 27

Figura 14 - Leyes promedio de minerales de óxidos y sulfuros a nivel nacional 2012-2016. Fuente: Cochilco 2016 28

Figura 15 - Producción de Cu fino en concentrados vs procesamiento de minerales sulfurados, 2015 – 2027. Fuente: Cochilco 2016 28

Figura 16 – Producción de Relaves Chile y el Mundo. Fuentes 2012 29

Figura 17 – Flujo de corte y extensional. (Barnes 2000) 30

Figura 18 – Deformación de un diferencial de volumen. (Barnes 2000). 31

Figura 19 – Deformación Angular. (Fuentes 2012). 31

Figura 20 - Tensión de fluencia versus concentración en peso. (Boger 2006) 33

Figura 21 – Diagramas Reológicos. (Fuentes 2012) 34

Figura 22 – Viscosidad v/s concentración. (Fuentes 2011) 36

Figura 23 – Viscosidad aparente con respecto a fracción de partículas. (Fuentes 2011) 38

Figura 24 – Diagrama de Viscosidad relativa en función de granulometrías. (Heywood 1991). 38

Figura 25 – Viscosidad en función de pH. (Fuentes 2011) 39

Figura 26 – Tensión de fluencia en función de pH. (Fuenes 2011). 39

Figura 27 – Tensión de fluencia en función de pH. (Fourie 2002). 39

Figura 28 – Esquema de funcionamiento de reómetro con sensor Vane. (Boger 2006) 40

Figura 29 - Nguyen & Boger (1983) 40

Figura 30 – Sensor Vane en experimento de Pierre & Perrot (2017). 42

Figura 31 – Sensor Vane en experimento de Pierre & Perrot (2017). 42

Figura 32 – Esquema de comportamiento tixotrópico. (Botchu 2015) 43

Figura 33 – Ensayo de triple intervalo. (Larenas 2010). 44

Figura 34 – Esquema de aparato cizallador. (Pornillos 2011) 45

Figura 35 – Pérdida de tensión de fluencia con respecto a tiempo de cizalle. (Pornillos 2011) 45

Figura 36 – Reducción de Tensión de fluencia con respecto a energía absorbida. (Pornillos 2011) 45

Figura 37 - Curva Granulométrica Muestra 1 48

Figura 38 – Balde con muestra y remo de mezclado 49

Figura 39 – Secuencia de ensayo. 49

Figura 40 - Muestra después de ser ensayada. 50

Figura 41 - Tensión Fluencia a distintos tiempos de cizalle 51

Figura 42 - Resultados directos de reómetro con valores negativos en cambio de etapa 52

Figura 43 – Inercia de Agua y momento medido 54

Figura 44 - Mejor ajuste con y sin valores extremos 54

Figura 45 - Decaimiento de giro libre Vane en agua. 55

Figura 46 - Tiempo al reposo – Giro libre en agua 56

Figura 47 - Tiempo al reposo en relaves 57

Figura 48 - Estufa de secado 58

Figura 49 - Disgregado de muestra en Tamiz #40 59

Figura 50 - 12 muestras para su correspondiente ensayo 59

Figura 51 - Muestra en Reómetro 59

Figura 52 - Protocolo estándar de cizalle sensor Vane 59

Figura 53 - Sistema de granulometría laser 60

Figura 54 - Vidrio Reloj con muestras para cálculo de Cp 61

Figura 55 - Variación Porcentual cizalle sensor Vane M7 63

Figura 56 – Variación Porcentual cizalle sensor Vane M8 63

Figura 57 - Resumen M7 y M8 64

Figura 58 – Posible Efecto de Sedimentación. 66

Figura 59 - Impulsor con tornillo central. (Fasano 2015) 67

Figura 60 - Maquina Mezcladora de Jugos. 68

Figura 61 – Granizadora. 68

Figura 62 - Protocolo cizalle Helicoidal 68

Figura 63 - Variación porcentual de tensión de fluencia al aplicar cizalle con sensor Helicoidal 69

Figura 64 – Variación Porcentual cizallando con Vane y Helicoidal..... 70

Figura 65- Variación porcentual de tensión de fluencia al aplicar cizalle con sensor Vane; Muestra M7; Floculante en dosis 15[g/t]. 71

Figura 66 - Variación porcentual de tension de fluencia con sensor Helicoidal; Muestra M7; Floculante en dosis 15[g/t] 72

Figura 67 - Comparación de Cizalle Vane y Helicoidal Con Floculante Dosis 15[g/t] 73

Figura 68 - Representación simplificada del proceso de floculación (Fitzpatrick 2004) 74

Figura 69 – Protocolo de cizalle y recuperación en relaves 76

Figura 70 - Granulometría Laser de muestra MEL..... 77

Figura 71 – Variación Tensión de Fluencia Cp=55% 79

Figura 72 - Variación Tensión de Fluencia Cp=65%. 79

5. Índice de Tablas

Tabla 1 – Producción y Longitud de transporte de relaves en Chile (Fuentes 2012). 30

Tabla 2 – Coeficientes de Thomas 37

Tabla 3 – Granulometría Muestra 1 48

Tabla 4 – Parámetros de Muestra 1 48

Tabla 5 – Concentración de solidos de Muestra 1 49

Tabla 6 - Tensiones de fluencia a distintos cizalles 51

Tabla 7 - Tiempo hasta el cese de mediciones. 55

Tabla 8 - Tiempo a la detención del giro libre del sensor Vane. 55

Tabla 9 – Interferencia real de inercia en la medición de τ_f 57

Tabla 10 – RPM de ensayo 60

Tabla 11 -Resumen características muestras M7 y M8 65

Tabla 12 - Valores de tensión de fluencia al aplicar cizalle externo 69

Tabla 13 - Variación de tensión de fluencia con sensor Vane y floculante 71

Tabla 14 - Variación de tensión de fluencia cizalle sensor Helicoidal 72

Tabla 15 – Granulometría Muestra MEL 77

Tabla 16 - Tensiones de Fluencia post cizalle. 78

Tabla 17 - Variaciones porcentuales de Tensión de Fluencia original y final a las 2 horas 80

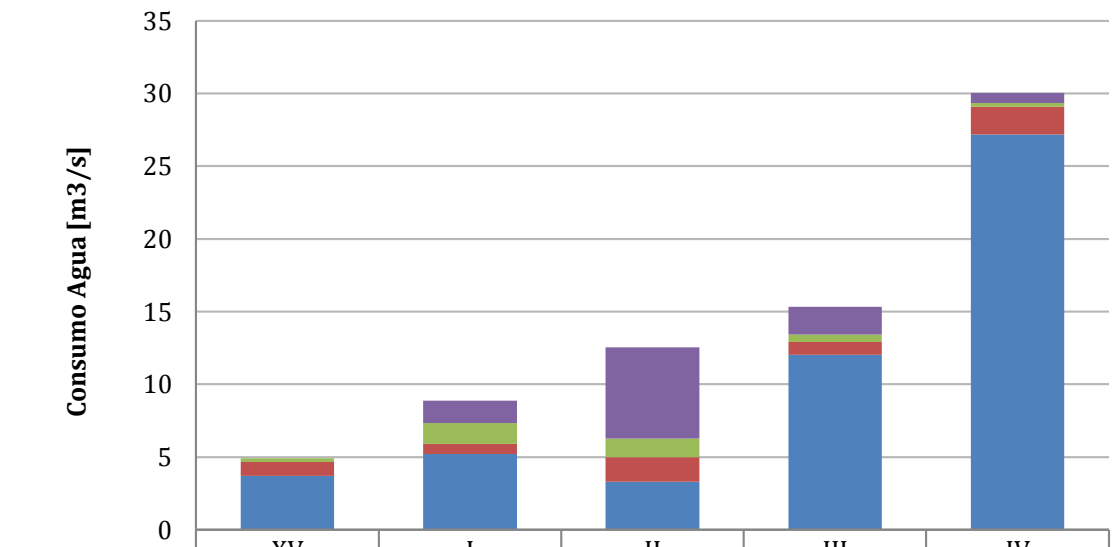
6. Glosario de Variables

τ	Tensión tangencial.
τ_f	Tensión de Fluencia.
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación angular.
μ	Viscosidad.
μ_B	Viscosidad de modelo Bingham.
μ_c	Viscosidad de modelo pseudoplástico con tensión de fluencia.
K	Constante de modelo pseudoplástico.
n	Exponente de modelo pseudoplástico con tensión de fluencia.
Cv	Concentración en volumen/volumen.
Cp ; Cm	Concentración en Peso/Peso.
d10	Diámetro de tamiz que deja pasar el 10% de la muestra.
d50	Diámetro de tamiz que deja pasar el 50% de la muestra.
d80	Diámetro de tamiz que deja pasar el 80% de la muestra.
φ	Fracción de volumen de fase dispersa en modelo de Heymann.
Rv	Radio de sensor Vane en hipótesis de Nguyen & Boger.
H	Alto del sensor Vane en hipótesis de Nguyen & Boger.
T	Torque total en hipótesis de Nguyen & Boger.

7. Introducción

La gestión de recursos hídricos en la zona norte del país, se ha posicionado como un elemento primordial en el quehacer minero y su desarrollo eficiente, responsable y sostenible.

Considerando que el 78% del total nacional de la actividad minera se concentra en el norte de chile, resulta importante el análisis de la competencia de la minería por el uso del recurso hídrico con otras áreas. En el gráfico de la Figura 1, se muestran los distintos consumos consuntivos de agua en minería con respecto a las áreas agropecuaria, industrial y sanitaria, agrupadas por región.



	XV	I	II	III	IV
Minero	0	1,54	6,26	1,9	0,71
Industrial	0,25	1,43	1,29	0,52	0,25
Agua Potable	0,96	0,69	1,68	0,87	1,89
Agropecuario	3,71	5,21	3,31	12,03	27,19

Figura 1- Distribución de los usos consuntivos del agua a nivel regional. Zona Norte. Fuente: Atlas del Agua en Chile, DGA 2016.

En específico para el sector minero se tiene tres fuentes de agua; el *agua continental*, el *agua de origen oceánico* y las *aguas recirculadas* del proceso minero. La primera considera todos los cuerpos de agua permanentes que se encuentran en el interior, alejados de las zonas costeras. Algunas aguas continentales son ríos, lagos, llanuras de inundación, reservas,

humedales, acuíferos y sistemas salinos de interior. Las aguas de origen oceánico, provienen del mar y tienen un alto contenido salobre. Por último, las aguas recirculadas corresponden a todos aquellos flujos que son reinyectados al sistema que pueden ser previamente tratados o no. El resumen de estos consumos (Aguas oceánicas, continentales o recirculadas) se observa en el gráfico de la Figura 2.

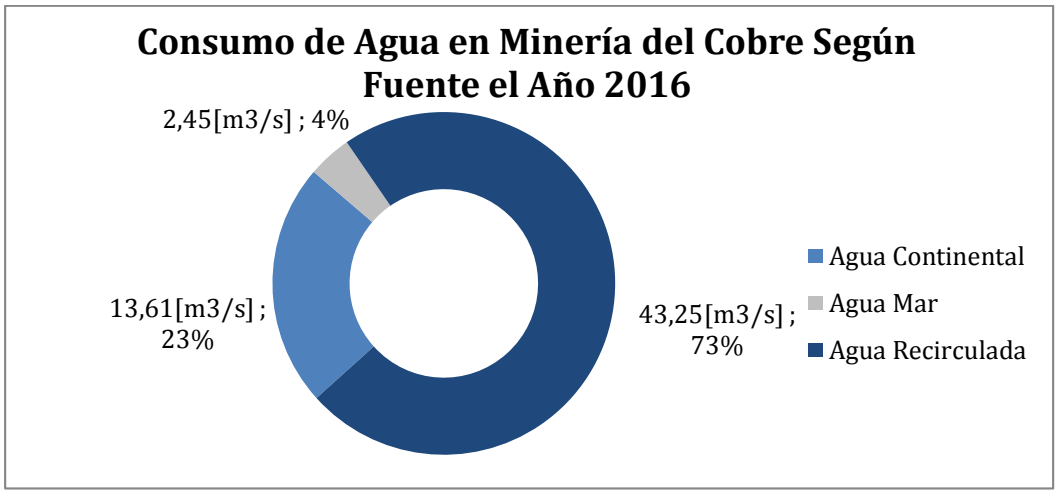


Figura 2 - Consumo de agua continental en minería según fuente el año 2016. Fuente: Cochilco 2016.

Del consumo total de aguas para los procesos mineros, en el gráfico de la Figura 3, se desglosa el consumo sólo de agua continental, pues son aquellas que están sujetas a restricciones de disponibilidad. Se observa que las fuentes subterráneas son la mayor fuente de abastecimiento para la industria minera.

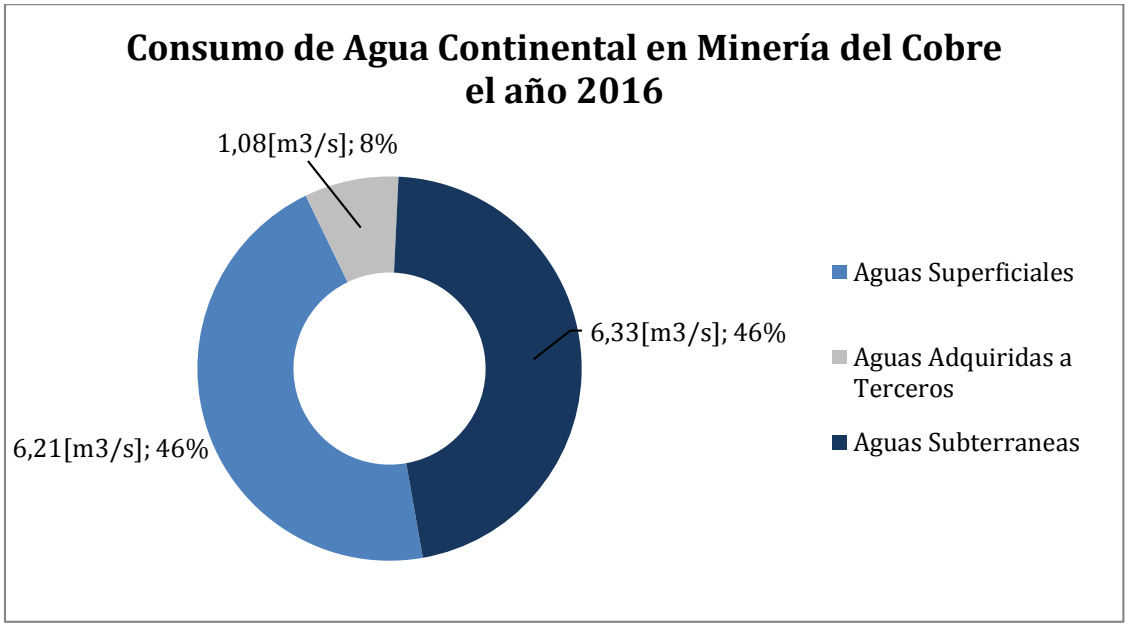


Figura 3 - Consumo de agua continental en minería el año 2016. Fuente: Cochilco 2016.

De los 13,61 [m³/seg] de aguas continentales utilizados en la minería del cobre durante el 2016, estos se pueden clasificar de acuerdo a los procesos mineros a los que son destinados el uso del agua. En la Figura 4 observa que el mayor consumo de agua fresca es en el proceso de Concentración.

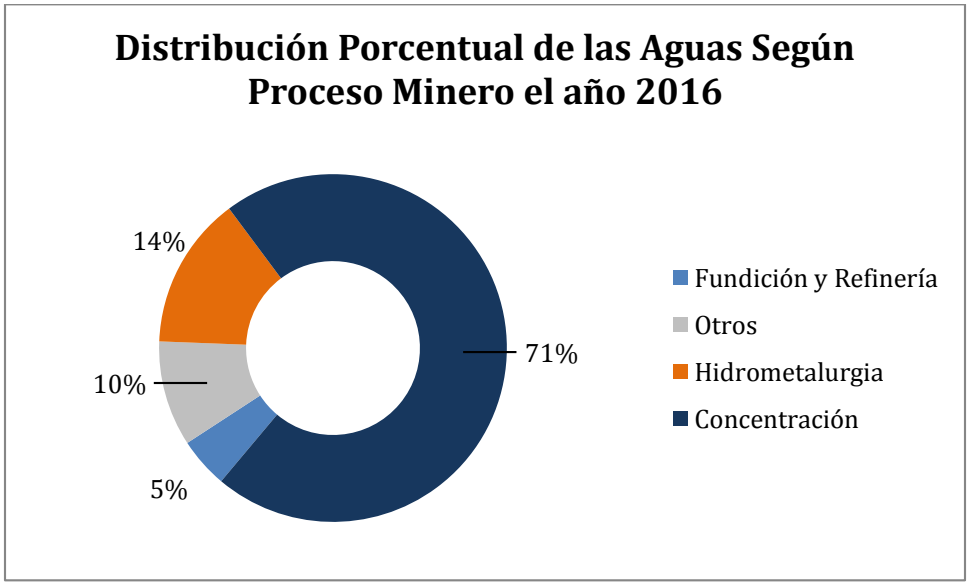


Figura 4 - Distribución Porcentual de las Aguas Según Proceso Minero el año 2016. Fuente: Cochilco 2016.

Considerando que la menor disponibilidad de agua en el país se presenta de manera más brusca en la zona norte, ha motivado a las empresas mineras a buscar nuevas fuentes de abastecimiento para asegurar la producción o mantener distintas propuestas de valor ante sus

comunidades. Bajo este concepto, el uso de agua de mar, salada o desalada, ya es una variable en la evaluación de distintos proyectos y una solicitud constante por un sector de la ciudadanía para mantener la sustentabilidad del sector en su ámbito social. Esta tendencia se puede ver en el gráfico de la Figura 5.

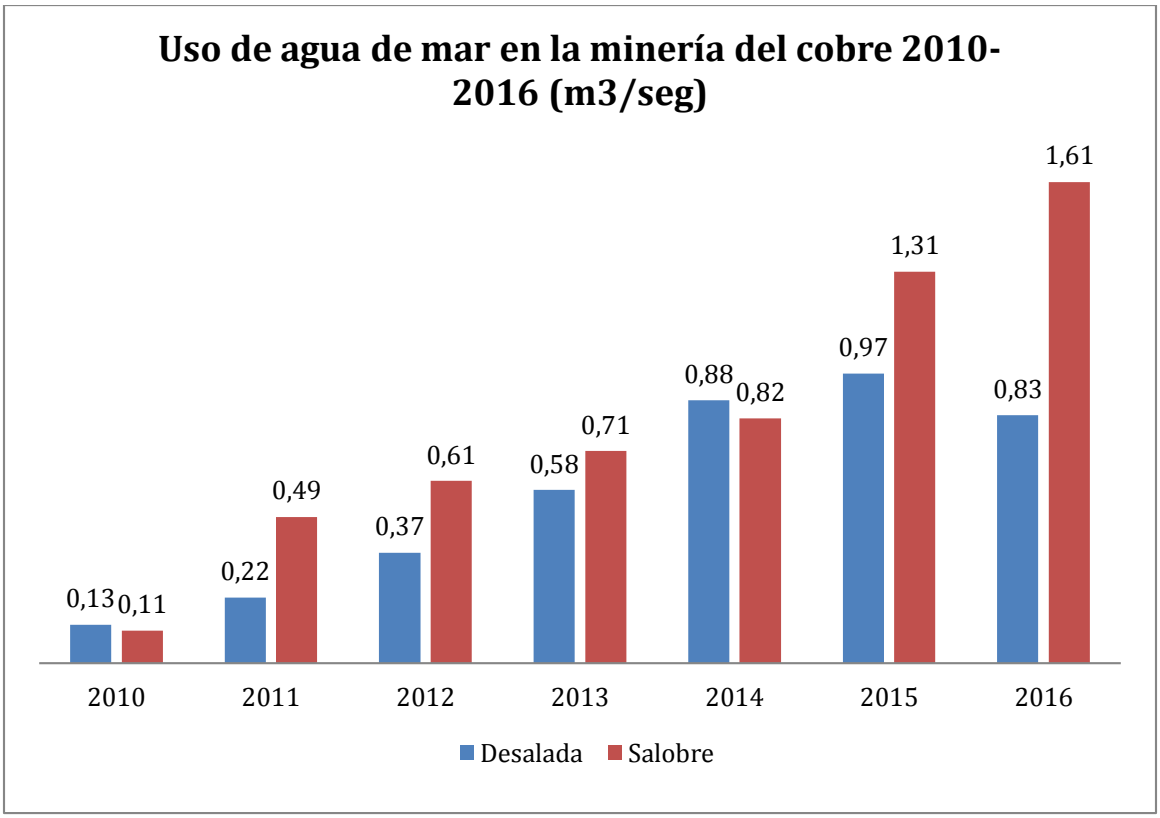


Figura 5 - Uso de Agua de mar en la minería del cobre 2010-2016. Fuente: Cochilco 2016.

Es fundamental estar al tanto de la estrecha relación que existe entre el uso de agua de mar y el consumo energético, pues de una manera u otra estamos traspasando el obstáculo de escasez hídrica a un problema energético. El costo del agua se transforma ineludiblemente en costo energético. Según Juan Rayo (2012) el costo del agua oscila entre los 2,0 y los 3,5 [USD/m^3] en mina.

Los relaves son un fluido bifásico, compuestos de agua y sólidos, donde aquella actúa como fase transportante y los segundos viajan en suspensión. Éstos, pueden ser caracterizados por sus propiedades reológicas: **tensión de fluencia** y **viscosidad**.

Actualmente, para los sistemas de transporte de relaves (STR), se utiliza principalmente el transporte hidráulico, ya sea en tuberías en presión como en conducciones en superficie libre.

Debido a la escasez y el costo del agua, indispensable para la actual tecnología de transporte, su uso debe minimizarse, consiguientemente, es deseable espesar los relaves al máximo, recuperando la mayor cantidad de agua posible en la proximidad de las plantas concentradoras y transportarlos a depósito de relaves a la mayor concentración de sólidos posible.

Figura 6 - Espesadores MLP.

El desafío de transportar relaves altamente espesados presenta enormes dificultades hidráulicas debido a la preponderancia de los parámetros reológicos en altas concentraciones. Su determinación, cuantificación y comprensión es capital para el desarrollo del transporte hidráulico de sólidos.

La presencia de arcillas en cuerpos mineralizados tiene una directa relación con el comportamiento de las variables reológicas recién mencionadas. Las partículas inorgánicas de arcilla exhiben la forma de plaquetas finas, formando un “castillo de naipes”. Las grandes superficies planas tienen carga negativa, mientras que los lados y bordes están cargados positivamente (Mezger 2014).

En la actualidad existen espesadores de alta capacidad "HRT" (por sus siglas en inglés High Rate Thickner) como los que se ven en la ilustración de la Figura 6, que permiten mejorar la capacidad de recuperación de agua. Sin embargo, al aumentar las concentraciones de los relaves en los espesadores, más grandes serán los valores de los parámetros reológicos, aumentando las pérdidas friccionales y consumo energético, incrementando el riesgo de embanques debido a laminarización. Además, en la actualidad se sabe que algunos relaves tienen comportamiento variables debido al cizalle y al tiempo (de esfuerzo de corte y de reposo), que en algunos casos se intuye tixotrópico, es decir, al ser cizallados (por ejemplo al pasar a través de bombas centrífugas, cajones, etc.) disminuyen sus propiedades reológicas

(Fuentes 2007). Sin embargo, no se ha estudiado el comportamiento de esta disminución en el tiempo ¿se mantiene, sube o disminuye?

En la industria existen conducciones de muy larga distancia de relaves justo aguas abajo de equipos que han generado cizalle (estaciones de bombeo, cajones de traspaso, etc). Estas conducciones se diseñan bajo el supuesto que los valores reológicos del relave se mantendrán constantes durante el tiempo que son transportadas.

Por lo tanto, la aplicación directa de esta memoria de título, es conocer y cuantificar el comportamiento reológico de los relaves post-cizalle, de modo de obtener diseños de transporte más seguros y eficientes, permitiendo controlar efectos adversos como embanques, rebalses, escurrimientos laminares indeseados o el aumento del costo energético del transporte, entre otros.

8. Objetivos

- A través de ensayos experimentales en el Centro de Investigación de Juan Rayo Ingeniería (CI-JRI) se busca estudiar el posible comportamiento tixotrópico de distintos tipos de relave, considerando distinta concentración de sólidos, pH, granulometría, tiempo de cizalle, velocidad de cizalle y uso de floculante.
- También se pretende validar un protocolo de ensayo en laboratorio, que permita caracterizar las posibles propiedades tixotrópicas de relaves que necesiten ser analizados, según las características del relave a ser ensayado. Este protocolo deberá entregar resultados reproducibles y comparables para distintas muestras.
- Realizar mediciones en un lapso con equivalencia industrial, del comportamiento reológico de los relaves después de haber sido sometidos a distintas configuraciones de cizalle.

9. Revisión Bibliográfica

9.1. Historia del transporte hidráulico en minería

El transporte de sólidos por tuberías hizo su aparición el año 1850 durante la fiebre del oro en California con el uso de canaletas que ayudaban al desvío del agua del rio mezclada con sedimentos para ser procesada la extracción del oro (Hamilton 1932) como se ve en la ilustración de la Figura 7.

Figura 7 - Fiebre del Oro en California 1858. Fuente: uintahbasintah.org

Posteriormente, se emprendió la construcción de nuevas tuberías de poca importancia en cuanto a dimensiones y caudales, cuyo diseño se basaba más que nada en la intuición del usuario, hasta que en el año 1889, Wallace Andrews en los Estados Unidos, reclamó una patente para un sistema que bombeaba sólidos a través de un ducto. Esta patente (actualmente obsoleta) declaraba un método para "transportar materiales sólidos en condiciones naturales o artificiales, de tamaños finos, que son introducidos en un líquido y transportados a distancia mediante una tubería, ya sea por gravedad o mediante bombeo".

A nivel nacional, el desarrollo de transporte hidráulico comienza con la construcción de canaletas de relaves en Sewell, Codelco División El Teniente (Figura 8 y Figura 9), en la década de 1920 la cual tuvo un diseño esencialmente artesanal y opera hasta el día de hoy transportando mineral molido hacia Planta Concentradora Colón. Actualmente tiene una longitud de 9.3[km] y una capacidad de transporte de 15[ktpd] (Trade Off Sistema de Transporte de Pulpa. JRI. 2012).

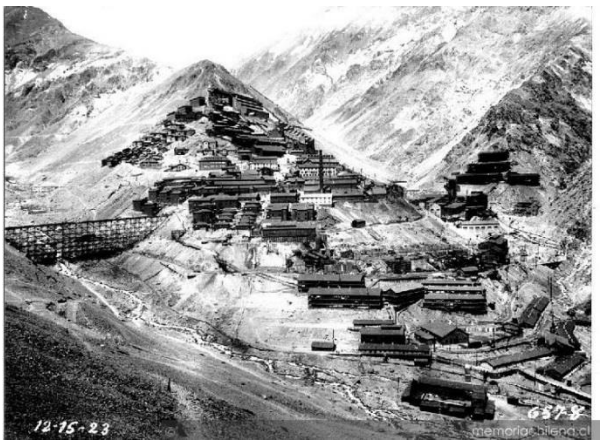


Figura 8 - Sewell 1920
Fuente: memoriachilena.cl

Figura 9 - Canaleta Madera Operativa. Año 2012. Sewell.
Fuente: Archivo Fotográfico JRI.

El primer concentraducto fue construido en el año 1959 en lo que actualmente es la División Salvador de Codelco-Chile, ubicada en la Región de Atacama. Consta de dos tuberías de acero en 5 pulgadas de diámetro que opera en superficie libre, con una longitud de 20[km]. Este concentraducto va desde la planta concentradora hasta la planta de filtros en Llanta.

El primer relaveducto se construyó a principios de 1970 en Minera Andina, Región de Valparaíso, hoy perteneciente a la misma corporación. Este relaveducto fue diseñado en 14 pulgadas, que desembocaba en el Tranque Los Leones, con una longitud de 11 kilómetros.

Por último, la construcción del primer mineroducto, con su trazado en planta como muestra la Figura 10, fue en el año 1981, en Minera Disputada, ubicada en la Región Metropolitana. Este mineroducto fue diseñado en acero de 20 pulgadas, que conectaba desde el

yacimiento Los Bronces hasta la planta Las Tórtolas, con una longitud de casi 50[km]. Operó hasta aproximadamente el año 2004, cuando comenzó a utilizarse como acueducto.

Figura 10 - Trazado Ex Mineroducto 20'' Ex Minera Disputada. Actual Acueducto. Google Earth.

A nivel mundial, uno de los mineroductos más grandes, corresponde al del proyecto de hierro "Minas-Rio", propiedad de Anglo American. Este mineroducto tiene una longitud de 529 kilómetros y un diámetro de 26 pulgadas.

Como parte del desarrollo de nuevas tecnologías en el transporte de relaves, está la capacidad de transporte de pulpas en pasta, con una alta eficiencia en el manejo del agua. Un proyecto emblemático en la utilización de esta tecnología corresponde al utilizado por minera Esperanza, actual Centinela.

9.2. Escasez del Recurso Hídrico

En las *Perspectivas Ambientales de la OCDE hacia 2050* se proyectan las tendencias demográficas y económicas para las próximas cuatro décadas, donde se evalúa el impacto de dichas tendencias sobre el medio ambiente en el caso en que la humanidad no implemente políticas más ambiciosas para una mejor gestión de los recursos naturales. Respecto a los recursos hídricos se establece que la disponibilidad de agua dulce se verá aún más restringida ya que habrá más de un 40% de la población global que vivirá en cuencas hidrográficas con un estrés hídrico severo. Se pronostica que la demanda mundial de agua aumente en un 55%, debido a la creciente demanda de la industria (+400%), la generación de energía termoeléctrica (+140%) y el uso doméstico (+130%).

En el gráfico de la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos para el consumo total de agua en el sector de la minería del cobre. Éste incluye tanto el agua fresca como agua proveniente del mar.

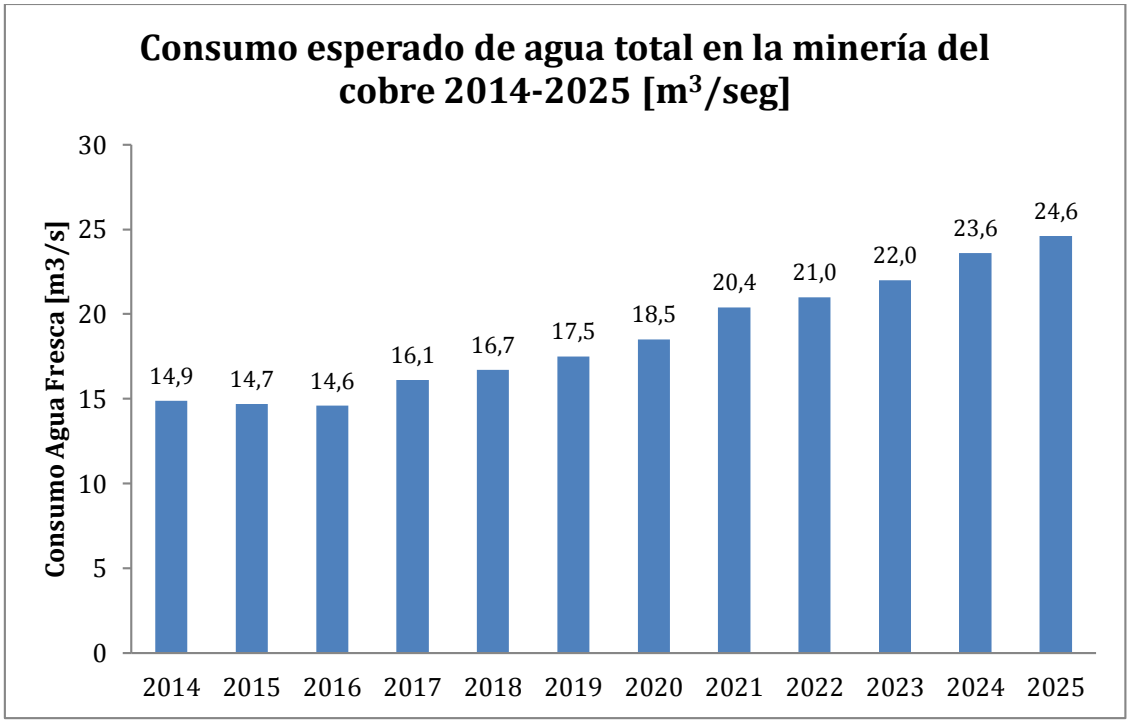
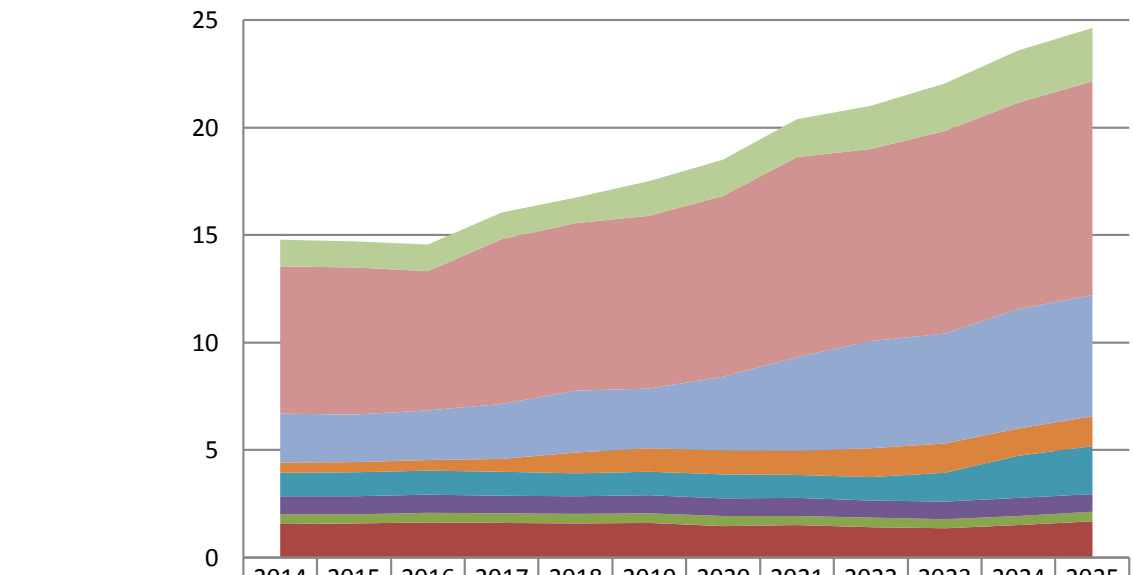


Figura 11 - Consumo esperado de agua total en la minería del cobre 2014-2025 (m3/seg). Fuente: Cochilco 2016.

Se observa que al 2025 el consumo de agua total aumentará en un 66% respecto al 2014, alcanzando los 24,6 [m^3/seg]. El aumento en el consumo de agua total en la minería del cobre varia en similar proporción que el aumento de producción. Si todos los proyectos se materializan según el calendario actual, su máxima capacidad productiva de cobre mina (concentrados + cátodos SxEw) alcanzaría el año 2025 a 8,5 millones de toneladas, un 47,8% sobre la producción real del año 2013. El mayor incremento en el consumo de agua se debe principalmente por la tendencia decreciente en las leyes de los concentrados, lo que hace necesario procesar mayor cantidad de mineral para obtener una tonelada de cobre fino.

En el gráfico de la Figura 12 se observa que la mayor parte del consumo esperado de agua se encuentra en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo, abarcando el 79% del consumo de agua. A esta situación hay que agregar que, según el Atlas del Agua en Chile (2016), es el área geográfica más seca de Chile, con uno de los paisajes más áridos del mundo, donde gran parte del territorio es cubierto por el Desierto de Atacama y que presenta una escorrentía total de 36,9[m3/s].



	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Tarapacá	1,26	1,2	1,25	1,24	1,18	1,59	1,69	1,75	2,01	2,21	2,41	2,47
Antofagasta	6,83	6,86	6,47	7,66	7,81	8,04	8,4	9,31	8,92	9,44	9,61	9,97
Atacama	2,29	2,21	2,32	2,57	2,87	2,79	3,42	4,36	5	5,11	5,57	5,61
Coquimbo	0,48	0,47	0,48	0,59	0,96	1,08	1,13	1,12	1,32	1,35	1,25	1,4
Valparaíso	1,09	1,11	1,13	1,13	1,07	1,11	1,12	1,07	1,09	1,34	1,97	2,23
Metropolitana	0,83	0,84	0,83	0,81	0,81	0,84	0,81	0,83	0,8	0,82	0,83	0,83
No determinada	0,45	0,44	0,45	0,44	0,45	0,45	0,46	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
O'Higgins	1,56	1,57	1,64	1,61	1,59	1,58	1,45	1,48	1,4	1,33	1,48	1,66
Arica y Parinacota	0	0	0	0	0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Figura 12 - Consumo esperado de agua total en la minería del cobre por región 2014-2025 [m³/seg]. Fuente: Cochilco 2016.

9.3. Situación de los Relaves en Chile

Los relaves son desechos de procesos mineros (como la flotación), que consisten principalmente en una mezcla de: minerales finamente molidos, agua y en menor medida distintos tipos de reactivos utilizados en el proceso de flotación y espesamiento.

La disposición de los relaves es comúnmente identificada como la fuente más importante de impacto ambiental para muchas operaciones mineras (EPA 1994).

Durante el siglo pasado, los volúmenes de relaves que se generan han crecido dramáticamente a medida que la demanda de minerales y metales aumenta.

En el gráfico de la Figura 13 se observa un considerable aumento en la cantidad procesada de sulfuros de cobre en los últimos 5 años. Los minerales sulfurados se tratan típicamente mediante el proceso de concentración, el cual es el más intensivo en el uso de agua.

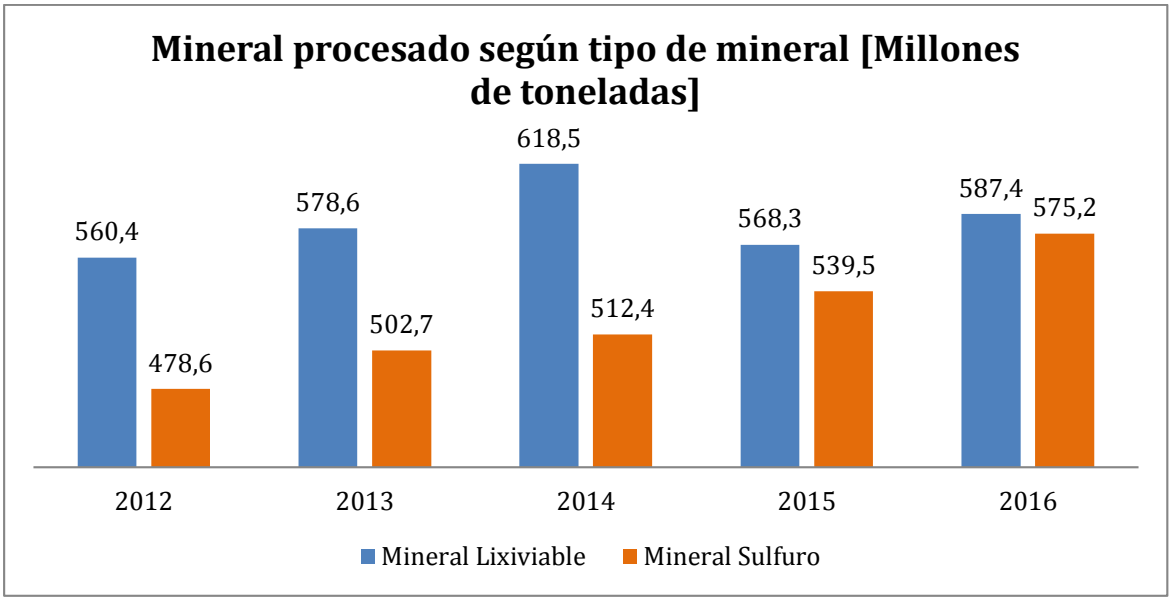


Figura 13 - Millones de Toneladas de Mineral Procesado Según Tipo de Mineral. Fuente: Cochilco 2016.

En general, los minerales con mayor nivel de leyes requieren menos agua para el procesamiento y viceversa, dado la cantidad de mineral que se debe procesar para producir una misma cantidad de metal. Con el agotamiento de los recursos, la explotación de minerales de baja ley va en aumento, lo que genera un aumento en la demanda de agua. El gráfico de la Figura 14 muestra la evolución de las leyes de los minerales, donde se observa una caída en los últimos años, lo que hace necesario el procesamiento de una mayor cantidad de mineral para obtener la misma cantidad de cobre fino. En el gráfico de la Figura 15 se muestra como el procesamiento de mineral crece a una tasa mayor que la producción de cobre fino en concentrados.

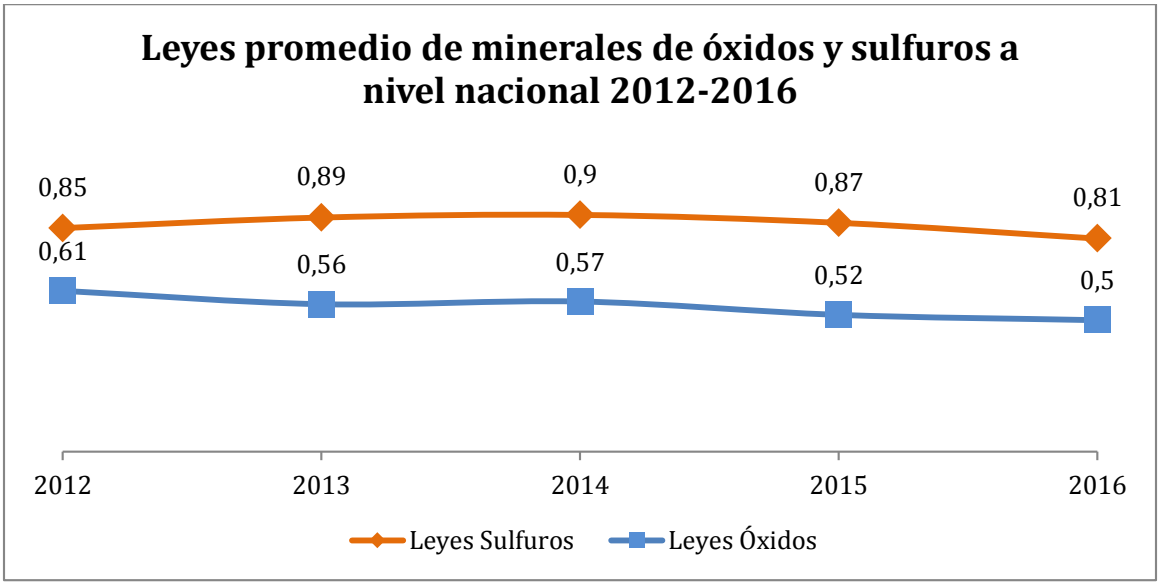


Figura 14 - Leyes promedio de minerales de óxidos y sulfuros a nivel nacional 2012-2016. Fuente: Cochilco 2016.

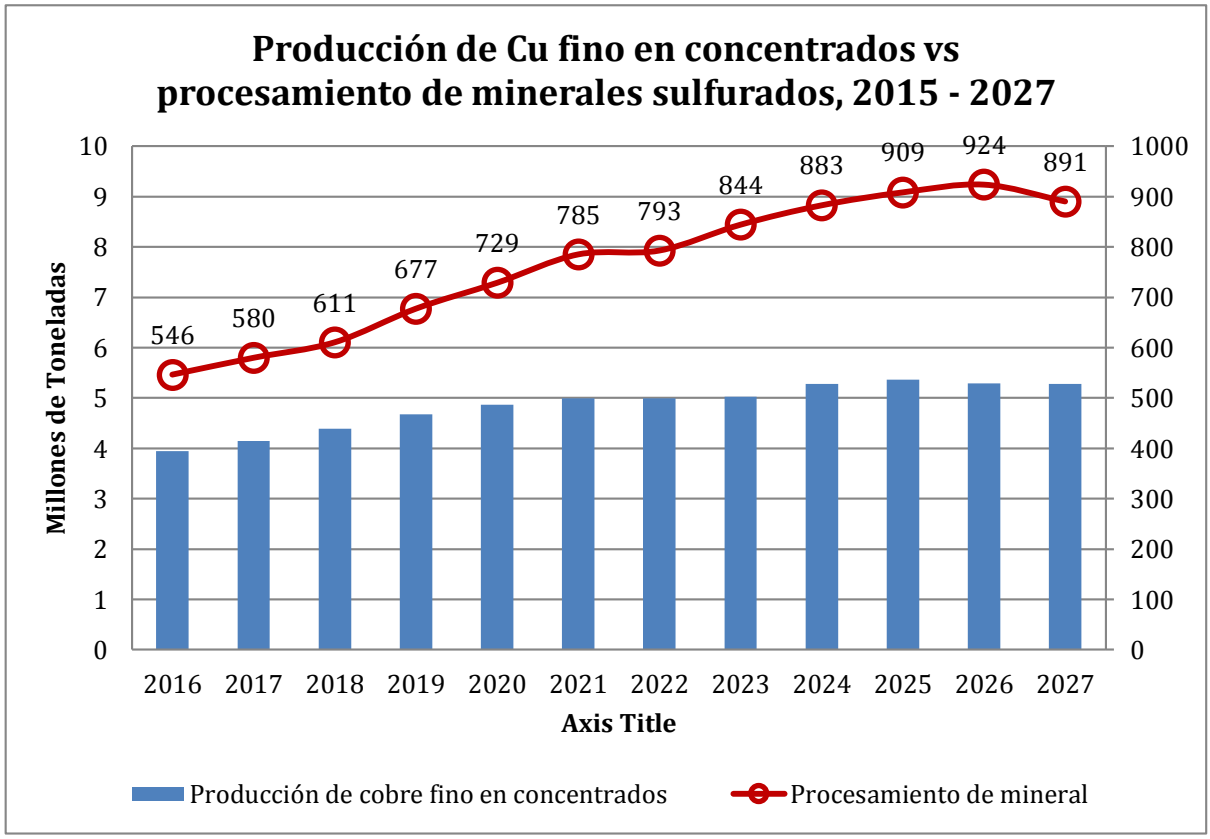


Figura 15 - Producción de Cu fino en concentrados vs procesamiento de minerales sulfurados, 2015 – 2027. Fuente: Cochilco 2016.

Además, a nivel mundial los yacimientos chilenos presentan la mayor producción de relaves en comparación con el resto del mundo como se aprecia en el gráfico de la Figura 16.

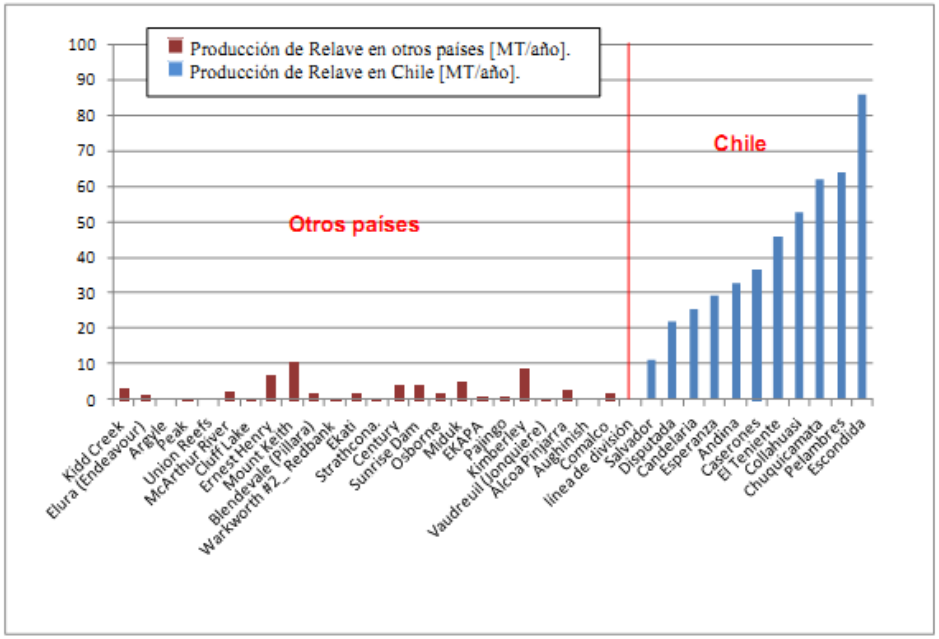


Figura 16 – Producción de Relaves Chile y el Mundo. Fuentes 2012.

Para poder lograr transportar grandes volúmenes de relaves a largas distancias, las soluciones más habituales utilizadas en Chile son las tuberías y las canaletas. La principal ventaja es que se prescinde del uso de energía en bombeos, utilizándose la conducción gravitacional, permitiendo un transporte continuo. Es por esta característica que los diseños están fuertemente limitados a la topografía donde será emplazado el trazado.

Cabe mencionar que las canaletas presentan ciertas desventajas particulares, como salpicaduras, derrames, caída de objetos al flujo o mayor exposición a inconvenientes del ambiente.

Las cifras más relevantes de las canaletas de relave chilenas se muestran en la Tabla 1 (Fuentes 2004). Se considera que estas canaletas son las más importantes del mundo. Ya Faddick (1986) hizo notar en 1986 que las mayores canaletas de relave del mundo eran las de El Teniente.

Tabla 1 – Producción y Longitud de transporte de relaves en Chile (Fuentes 2012).

Compañía	Ancho [m]	Longitud [km]	Producción [MTon/año]	Caudal [m3/s]	ML [MTon/año * Km]	Año puesta en marcha
El Teniente	1.4	84	35	1.52	2940	1983
Collahuasi	1.0	3	25	1.05	75	1998
Quillayes	1.2	9	44	1.66	396	1999
Andina	0.8	87	24	0.91	2088	1999
Codelco Norte	2.3	16	66	2.31	1056	2002

9.4. Reología y Granulometría

La reología se ha definido adecuadamente como el estudio del flujo y de la deformación de los materiales. Sin embargo, podríamos hacer la simple pregunta: ¿qué es el flujo? Si llevamos el agua cuidadosamente en un balde, sin duda se está moviendo, pero no está fluyendo, sin embargo, si vertemos el agua fluye. ¿Cuál es la diferencia? En el flujo, los elementos del líquido se deforman, y los puntos adyacentes se mueven uno *con respecto al otro*.

Hay dos tipos básicos de flujo con movimiento relativo; se definen como flujos de *corte* y de *extensión* (Mezger 2014). En los flujos con corte, los elementos líquidos fluyen *sobre* o pasan uno al otro, mientras que en el flujo extensional, los elementos adyacentes fluyen *hacia* o *alejándose* uno del otro, como se ejemplifica en la ilustración de la Figura 17.

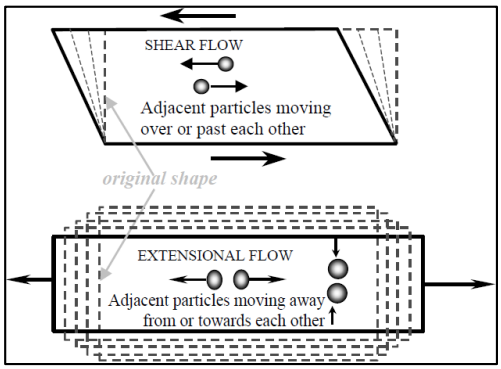


Figura 17 – Flujo de corte y extensional. (Barnes 2000)

Todos los flujos son resistidos por la viscosidad, así que si derramamos un balde de agua fluiría mucho más rápido que uno de aceite de motor. Los líquidos fluyen al impartir una velocidad o aplicar una fuerza (apretar una botella de kétchup o revolver con una cuchara).

Para una velocidad dada, la fuerza resultante aumenta cuando la viscosidad aumenta, mientras que para una fuerza dada, la velocidad se reduce cuando se aumenta la viscosidad.

En la ilustración de la Figura 18 se muestra el flujo de corte como el movimiento entre capas deslizándose unas sobre otras. En el caso más simple, la velocidad de cada capa varía linealmente con respecto a la adyacente.

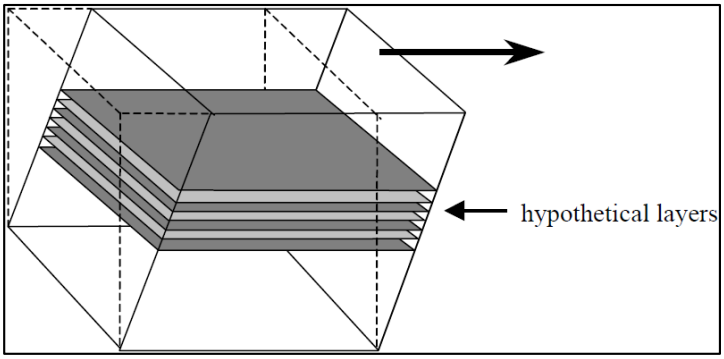


Figura 18 – Deformación de un diferencial de volumen. (Barnes 2000).

Por ejemplo, sea un escurrimiento en una dirección invariable. Más específicamente, se considera la capa de fluido comprendida entre dos planos paralelos separados a una distancia *dy*. Estos planos están orientados en la dirección del movimiento. En el plano superior el fluido tiene una velocidad superior en *du* a la del plano inferior. Aparece una tensión tangencial τ. Asimismo, se produce una deformación angular *dγ* como se aprecia en la ilustración de la Figura 19.

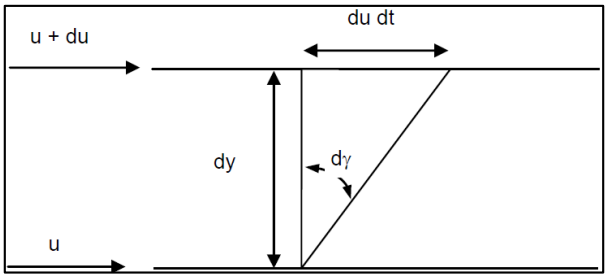


Figura 19 – Deformación Angular. (Fuentes 2012).

Por lo tanto:

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} \qquad (1)$$

$\dot{\gamma}$: $Velocidad\ de\ deformacion\ angular$

Si se miden du/dy y τ para diferentes valores del gradiente de velocidades se puede definir una curva:

$$\tau = f\left(\frac{du}{dy}\right) = f(\dot{\gamma}) \tag{2}$$

Por definición esta es la curva reológica, diagrama reológico o reograma de fluido. Se definen además:

$[\dot{\gamma}] = [segundo^{-1}]$

$[\tau] = [Pa] = 1\left[\frac{N}{m^2}\right]$

Estas son definiciones simples para el alcance de esta memoria, para mayor profundidad se puede consultar Bird et al (1960), Truesdell (1966), Truesdell & Noll (2004) y Ancey (2005).

Considerando los conceptos recién expuestos, es posible clasificar los relaves, por ejemplo, según su concentración (Fuentes 2012):

- Relaves Diluidos: Cp (10 – 30) [%]
- Relaves Normales*: Cp (40 – 60) [%]
- Relaves Espesados: Cp (60 – 65) [%]
- Pasta: Cp 70 [%]

O también clasificarse según su tensión de fluencia (Fuentes 2012):

- Relaves Diluidos: τ_f: 0 – 5 [Pa]
- Relaves Normales*[1]: τ_f: 5 – 20 [Pa]
- Relaves Espesados τ_f: ~100 [Pa]
- Pasta τ_f: 300 – [Pa]

* Relaves más frecuentes en la minería Chilena en la actualidad

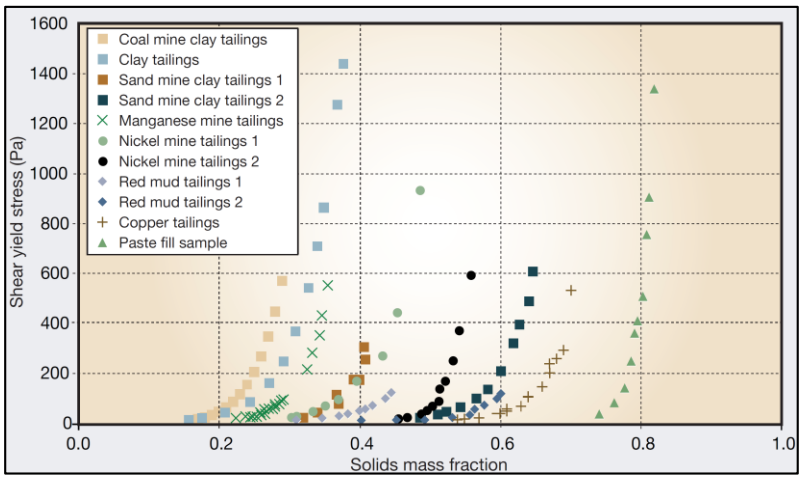


Figura 20 - Tensión de fluencia versus concentración en peso. (Boger 2006)

Boger (2006) realizó una comparación entre tensiones de fluencia para distintos tipos de relaves (carbón, arcilla, manganeso, Níquel, cobre, etc.) como se ve en el gráfico de la Figura 20.

La caracterización de las partículas es un problema complejo, ellas no solo pueden diferir en el tamaño y la forma sino incluso en la densidad. Cuando son muy pequeñas (del orden de micrones) las fuerzas de Coulomb, de Van der Waals y aquellas asociadas al movimiento browniano pueden ser preponderantes respecto a las gravitatorias. Asimismo, si las partículas miden decenas de micrones o menos y existen meniscos capilares (asociados normalmente a burbujas) las fuerzas de tensión superficial o de Laplace son relevantes frente al peso (Fuentes 2011).

Para las definiciones del tamaño, se emplearán las usadas habitualmente en Hidráulica Fluvial (García y Maza 1998, Vanoni 1977):

- **Diámetro nominal**: es el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen de la partícula.
- **Diámetro de sedimentación**: es el diámetro de una esfera de la misma densidad y velocidad de sedimentación W de la partícula sedimentando en el mismo fluido (iguales condiciones de temperatura y presión).
- **Diámetro de tamiz**: longitud del lado de una abertura cuadrada de una malla por la cual la partícula pasa ajustada.

En un intervalo cercano a (50 [μm], 25 [mm]) los diámetros pueden definirse con razonable facilidad mediante tamizado. Como este rango cubre una cantidad grande de aplicaciones y la operación de tamizado es relativamente sencilla y directa, el diámetro de tamiz

es el más usado en la práctica minera. Un problema frecuente es el de relacionar el diámetro de tamiz y el diámetro nominal. Existe una relación empírica entre estas magnitudes (García y Maza 1998):

$$d_{\text{tamiz}} = 0.9\ d_{\text{nominal}} \tag{3}$$

El conocimiento de la curva granulométrica es esencial para el flujo de suspensiones, tanto la *velocidad*, *la fricción* y *la capacidad portante* de la mezcla dependen del tamaño y distribución de las partículas (Fuentes 2011).

- Los grandes diámetros definen en forma decisiva la tasa de desgaste de la tubería.
- Los diámetros más pequeños influyen en el comportamiento reológico de la suspensión.
- El diámetro mediano (50 %) o d_{50} caracteriza el conjunto para ciertas propiedades.

9.5. Modelos Reológicos

En términos simples, los diagramas reológicos son expresiones de la curva reológica, como se ejemplifican en la Figura 21. Los más usados son:

- Newtoniano — Curva A
- Pseudoplástico — Curva B
- Dilatante — Curva C
- Plástico ideal — Curva D
- Pseudoplástico con tensión de fluencia — Curva E
- Dilatante con tensión de fluencia — Curva F

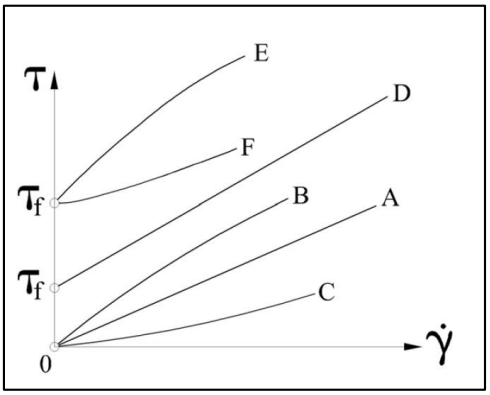


Figura 21 – Diagramas Reológicos. (Fuentes 2012).

Obsérvese que el fluido newtoniano mantiene una viscosidad invariable. Por su parte el pseudoplástico disminuye monotónicamente su viscosidad al aumentar la tasa de deformación angular. Contrariamente el dilatante aumenta su viscosidad al aumentar la tasa de deformación angular "$\dot{\gamma}$".

Los otros casos indicados (D, E y F) al igual que algunos sólidos, presentan una tensión de fluencia, esto es, es necesario superar una tensión tangencial crítica τ_f para que el fluido se ponga en movimiento (fluya).

Ahora, de forma matemática, existen modelos matemáticos que los describen (Fuentes 2011).

- **Pseudonewtoniano**:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \tag{4}$$

- **Bingham**. Plástico Ideal:

$$\tau = \tau_f + \mu_B \cdot \dot{\gamma} \tag{5}$$

- **Ostwald y de Waele**. Pseudoplástico o dilatante, según si $n < 1$ o $n > 1$, respectivamente::

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \tag{6}$$

- **Herschel y Bulkley**. Pseudoplástico o dilatante con tensión de fluencia (Coussot 1994):

$$\tau = \tau_f + K \cdot \dot{\gamma}^n \tag{7}$$

- **Casson**. Pseudoplástico con tensión de fluencia (Kruyt y Verel 1992):

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_f} + \sqrt{\mu_c \cdot \dot{\gamma}} \tag{8}$$

9.6. Reología de Relaves

Los parámetros (μ, μ_B, μ_c, τ_f, K, n, etc.) que aparecen en los modelos reológicos dependen de una larga lista de variables. Si se considera el problema de la dinámica de las partículas sólidas rodeadas por el líquido, una lista de variables no completa sería: densidad del líquido, viscosidad del mismo, aceleración de gravedad (decantación), tamaño de las partículas, número de partículas (concentración), distribución granulométrica, densidad de sólidos, fricción entre partículas (fricción de Leonardo y Coulomb), coeficiente de restitución (choques), fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, fuerzas de Langevin (movimiento browniano). Sin embargo, las variables que son manejables o pueden ser modificadas no son muchas. Una lista manejable para los alcances de esta tesis sería: *Concentración, Granulometría* y *pH.*

Concentración: Se refiere a la concentración de solidos totales disueltos en suspensión, es decir, una proporción relativa entre mineral y agua. Esta proporción puede ser definida según peso o volumen de los sólidos disueltos:

$$\text{Concentración de Sólidos en Volúmen (Cv)} = \frac{Volumen\ ocupado\ por\ las\ partículas}{Volumen\ ocupado\ por\ el\ líquido}$$

$$\text{Concentración de Sólidos en Peso (Cm)o (Cp)} = \frac{Masa\ de\ las\ partículas}{Masa\ del\ líquido}$$

La relevancia de este parámetro con las variables reológicas, es que la *viscosidad* crece con la concentración. Esta correlación se ha estudiado profundamente: para concentraciones relativamente pequeñas la viscosidad crece suavemente y para valores grandes crece en forma muy pronunciada.

Un diagrama esquemático que muestra la relación entre la viscosidad aparente μ_a de un fluido con sólidos disueltos y su concentración en masa *Cm*, se muestra en la el gráfico cualitativo de la Figura 22. Allí se indica que para bajas concentraciones la viscosidad queda definida por las interacciones hidrodinámicas entre las partículas. Para concentraciones relativamente elevadas además de los efectos hidrodinámicos, la fricción y los choques entre partículas comienzan a ser preponderantes. Ya cerca de la concentración máxima el sistema empieza a empaquetarse (Hales 2005), impidiendo que las partículas se deslicen unas respecto las otras. Estas consideraciones explican en parte el comportamiento que se observa en el diagrama.

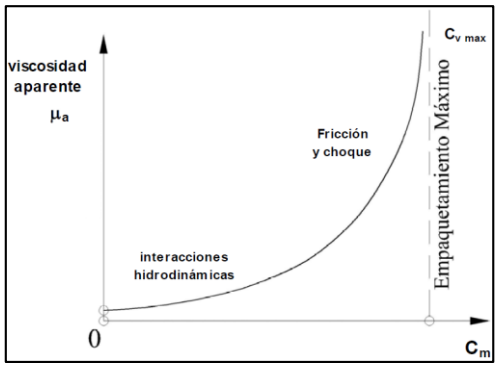


Figura 22 – Viscosidad v/s concentración. (Fuentes 2011).

Al parecer no existe un modelo teórico satisfactorio para la relación entre *tensión de fluencia* y la concentración. Por el contrario, existen numerosas expresiones empíricas. A continuación, se darán algunos ejemplos:

- Thomas, D.G. (1961), según Govier y Aziz (1972):

$$\tau_f = B \cdot {C_v}^3 \tag{9}$$

Se entiende que esta fórmula no puede dar resultados satisfactorios para una concentración en volumen cercana al empaquetamiento. A este respecto, existe una fórmula relativamente reciente que tiene base física y es la Heymann et al. (2002):

$$\tau_f = \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^2} - 1 \right] * \tau_0 \tag{10}$$

Donde:

τ_0 es un parámetro de ajuste, tal que, $\tau_f = \tau_0$ cuando $\varphi = \varphi_m(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}) \approx 0.2929$

- Thomas, A.D. (2010) también da una fórmula para la tensión de fluencia:

$$\tau_f = B\varphi^3 \cdot exp\left(2.7 \frac{\varphi}{1 - \varphi}\right) \tag{11}$$

B se calcula mediante la expresión siguiente:

$$B = \frac{C_2}{d_{50}^{N_2}[\mu m]} \tag{12}$$

Los coeficientes C2 y N2 se encuentran en la Tabla 2

Tabla 2 – Coeficientes de Thomas.

MATERIAL	C2	N2
Mineral	11838	11.713
Relave	3379.5	11.211
Concentrado	497.52	0.6269

Granulometría: Si las partículas son muy pequeñas, acciones eléctricas y viscosas producen aglomeración de las partículas y una consiguiente alta viscosidad. Para partículas de diámetro intermedio, la viscosidad se encuentra fijada por el movimiento relativo de las partículas debido a efectos hidrodinámicos y sus valores son moderados. Para partículas relativamente grandes la interacción del fluido y los granos deviene muy vigorosa y la viscosidad crece, como se observa en el gráfico cualitativo de la Figura 23.

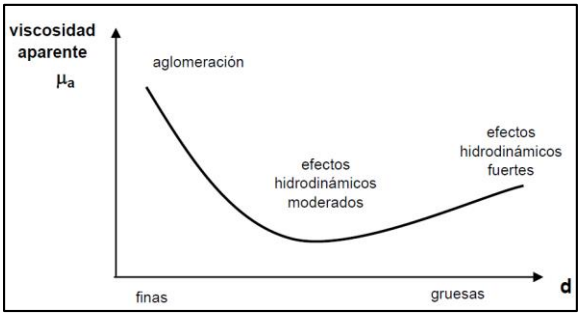


Figura 23 – Viscosidad aparente con respecto a fracción de partículas. (Fuentes 2011).

Como un antecedente interesante, en la Figura 24 se muestra un diagrama desarrollado por Farris (Heywood 1991) que indica un mínimo de la viscosidad relativa para una granulometría intermedia, a concentración *Cm* dada.

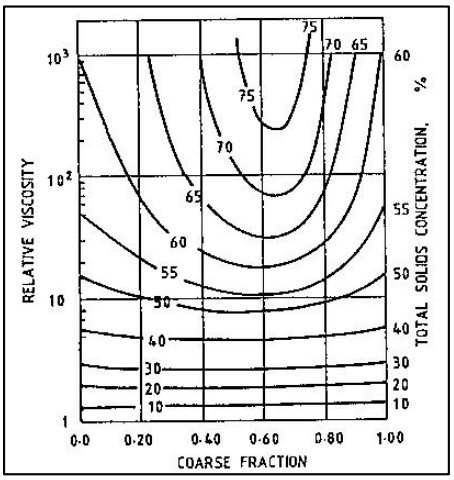


Figura 24 – Diagrama de Viscosidad relativa en función de granulometrías. (Heywood 1991).

τ_f decrece fuertemente cuando crece el diámetro de las partículas. Por ejemplo, según Thomas (Govier y Aziz 1972), para *Cv =cte:*

$$\tau_f \approx d^{-2} \tag{13}$$

pH: La influencia del *pH* sobre la viscosidad y tensión de fluencia se muestra en términos gruesos en los croquis de las Figura 25 y Figura 26. Se ve que la viscosidad aparente alcanza un máximo pronunciado para un cierto valor del *pH* y valores mucho menores a la derecha y a la izquierda de dicho valor, aunque estas tendencias decrecientes no son monotónicas.

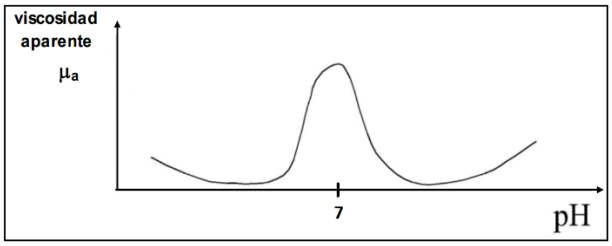


Figura 25 – Viscosidad en función de pH. (Fuentes 2011).

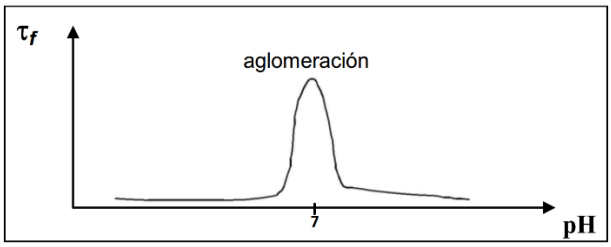


Figura 26 – Tensión de fluencia en función de pH. (Fuentes 2011).

Como un antecedente de interés, se muestra en el gráfico de la Figura 27 un estudio experimental sobre la influencia del *pH* y de la concentración en peso sobre la tensión de fluencia de un relave (Fourie 2002). Desgraciadamente, no se especifica el relave, pero presumiblemente es muy fino. Se encuentra que τ_f crece monotónicamente con C_p para un *pH* dado. Se observa asimismo que la influencia del *pH* para un C_m dado no es monotónica y exhibe un máximo para un *pH* ligeramente básico (≅7.5). Además τ_f se anula si el *pH* < 5 o si el *pH* > 10.

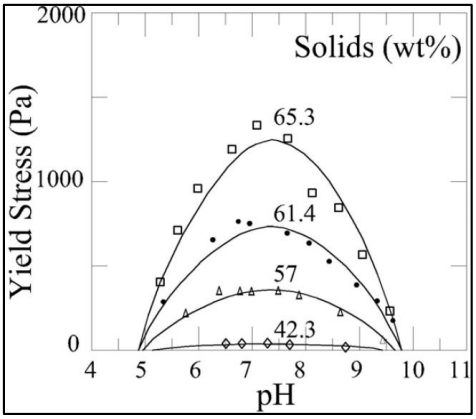


Figura 27 – Tensión de fluencia en función de pH. (Fourie 2002).

9.7. Reología Experimental

Cuando es de interés la medición de la tensión de fluencia en ciertos materiales (relaves), es necesario comprender la esencia de los ensayos y los equipos que se utilizan para este fin. Antiguamente la obtención de tensión de fluencia se realizaba exclusivamente de forma

indirecta por extrapolación de curvas (suponiendo comportamiento Bingham) obtenidas en un reómetro de cilindros concéntricos, también llamados Cilindros de Searle (Krieger 1952).

El problema de los Cilindros de Searle es la aparición de artefactos en las mediciones producto del deslizamiento de la pulpa en las paredes. En líquidos altamente estructurados el gradiente de cizalle no alcanza a desarrollarse por completo y el sensor arrastra la muestra por completo, en bloque, por las paredes de la copa.

Además de aumentar la rugosidad de las paredes de los elementos geométricos existentes, el sistema más ampliamente utilizado para eliminar los artefactos de pared es el sistema de paletas o en inglés: *Vane*. **Éste método para medir tensión de fluencia fue validado por Nguyen & Boger en 1983.**

El dispositivo Vane consiste en un rotor de paletas que se introduce lentamente en la muestra hasta sumergirlo completamente en ella, como se muestra en la Figura 28.

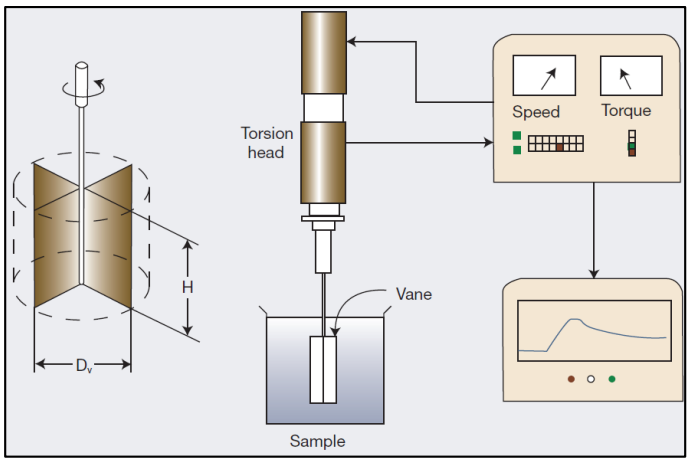


Figura 28 – Esquema de funcionamiento de reómetro con sensor Vane. (Boger 2006).

Una vez sumergido el dispositivo, se hace rotar lentamente a una velocidad angular constante. Para ello se aplica un torque que es medido como función del tiempo T(t). El gráfico de la Figura 29 muestra la curva de respuesta típica torque v/s tiempo observada con el método Vane.

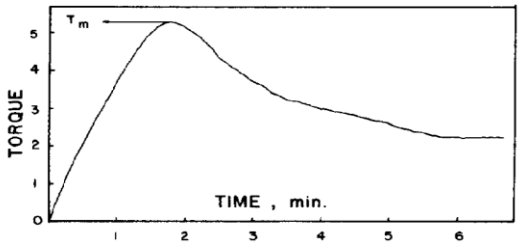


Fig. 2. A typical torque–time response curve observed with the vane method.

Figura 29 - Nguyen & Boger (1983)

Las zonas de la muestra en contacto con las paletas del dispositivo, se deforman elásticamente hasta que la red que conforma la suspensión se rompe gradualmente y, por ende, el torque necesario para mantener una velocidad angular constante disminuye.

Cuando se alcanza el torque máximo la suspensión fluye a lo largo de un cilindro virtual definido por las aletas del dispositivo Vane. Esta geometría permite relacionar la tensión de fluencia con el torque máximo medido. El método Vane no causa perturbaciones significativas a la muestra, útil en casos donde las muestras son sensibles a la historia del cizallamiento.

Para determinar la tensión de fluencia se asume que el dispositivo Vane es reemplazado por un cilindro de dimensiones similares, de esta forma, el torque medido es la sumatoria de los torques de la superficie del cilindro:

$$T = T_{manto} + T_{caras} = (2\pi R_v H)\tau_1 R_v + 2\left(\int_0^{R_v} 2\pi R \tau_1(r) r dr\right) \tag{14}$$

$$R_v = Radio\ Vane$$
$$H = Alto\ del\ Vane$$
$$\tau_1 = Esfuerzo\ de\ corte$$
$$T = Torque\ total$$

Luego:

$$\tau_1 = \frac{2}{\pi}\left[\frac{1}{\frac{H}{2R_v} + \frac{1}{3}}\right]\frac{T}{D^3} \tag{15}$$

Hipótesis simplificadoras (Nguyen & Boger 1983):

1) La tensión tangencial en la superficie cilíndrica limitada por las paletas τ_0 es constante.
2) La tensión tangencial sobre las caras circulares (superior e inferior) del cilindro varía linealmente con el radio, desde cero en el centro hasta τ_0 en el borde, donde τ_0 es el valor máximo.
3) El torque sobre el eje es despreciable.
4) El fondo de la vasija está suficientemente alejado de la sonda para que no influya sobre ella.

La única restricción de este método es que la pared del cilindro en que se encuentra la sonda no debe influir sobre el patrón de flujo. Para ello es necesario y suficiente que exista una zona no cizallada aledaña a las paredes del cilindro exterior (Sofra et al. 2007). Se define entonces, un radio límite, llamado de fluencia más allá del cual no existe cizalle.

Un antecedente interesante, es un estudio muy reciente publicado por Pierre & Perrot (Enero 2017) donde se discuten las limitaciones del método Vane. En tal geometría, la tensión y velocidad del cizalle pueden no estar uniformemente distribuidas en el gap, especialmente en las configuraciones con una gran separación (wide gap). Por lo tanto, hay que tener especial cuidado, debido a que las ecuaciones que relacionan torque y tensión de fluencia descansan en esta suposición.

Para poder validar la suposición de bulbo uniforme (y sus respectivos resultados) se aplicó tinta en muestras de caolinita, para que luego del cizalle, sean las distorsiones de estas líneas las indicadoras de un bulbo uniforme o no. Figura 30 y Figura 31.

Figura 30 – Sensor Vane en experimento de Pierre & Perrot (2017).

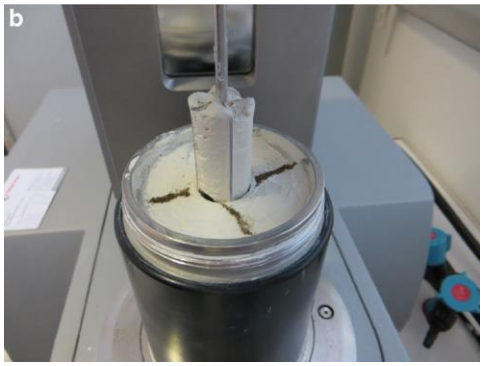


Figura 31 – Sensor Vane en experimento de Pierre & Perrot (2017).

El estudio concluye que la suposición de bulbo uniforme se aplica con dos condiciones: el material presenta interacciones coloidales a bajas tasas de cizalle y existencia de efectos hidrodinámicos a tasas altas de cizalle.

9.8. Tixotropía

El término "tixotropía" es una combinación de palabras griegas y no es tan fácil de traducir: "Tixis" (θίξις) significa tocar, en el sentido de perturbación al poner en movimiento (por ejemplo, cuando se agita o revuelve), y "Tropos" (τρόπος) , transformación.

La tixotropía se produce debido a algún cizalle aplicado durante un tiempo finito que logra inducir un cambio en la microestructura, que es llevada a un nuevo equilibrio entre las rupturas del cizalle y la regeneración propia del movimiento Browniano en fluidos. Entonces, cuando el cizalle termina, las únicas fuerzas restantes corresponden al movimiento Browniano, que es capaz de mover lentamente los elementos de la microestructura a posiciones más favorables y reestructurarla. Este fenómeno puede tomar varias horas en completarse.

Otra definición por Barnes (1997) es "Cuando una reducción en la magnitud de las propiedades reológicas de un sistema, tal como el módulo de elasticidad, tensión de fluencia y la viscosidad, se produce de forma reversible e isotérmica con una dependencia temporal distinta de la aplicación de la deformación por cizallamiento, el sistema se describe como tixotrópico" Esta definición se puede apreciar en el esquema de la Figura 32.

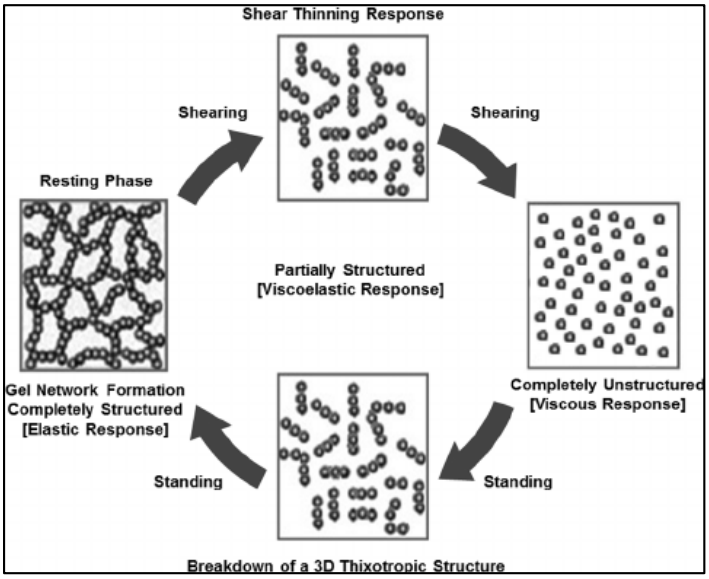


Figura 32 – Esquema de comportamiento tixotrópico. (Botchu 2015).

Entonces ¿Cómo medir la tixotropía? Uno de los test utilizados para estudiar el comportamiento tixotrópico que puede presentar un material corresponde al **3-ITT (3 Interval Thixotropy Test, Mezger 2014)**. Consiste en aplicar a la muestra 3 intervalos de corte constante (bajo-alto-bajo) y observar como sus propiedades reológicas se van modificando en cada uno de ellos, Figura 33.

Debido a que en cada intervalo de tiempo se mantiene constante la velocidad de deformación angular, se puede examinar la dependencia temporal ante el cizalle de la muestra. Si el material no presentara un comportamiento dependiente del tiempo, se esperaría observar valores de esfuerzo constante (Larenas, 2010).

- **Primer intervalo**: A la muestra no cizallada se le aplica una tasa de corte de $\Omega = 0.1\left[\frac{1}{seg}\right]$ durante 1 [min] para evaluar tensión de fluencia.
- **Segundo intervalo**: La muestra es vigorosamente cizallada a una tasa de corte de $\Omega = 100\left[\frac{1}{seg}\right]$ con *el mismo rotor Vane* durante 15[min].
- **Tercer intervalo**: A la muestra cizallada se le aplica una tasa de corte de $\Omega = 0.1\left[\frac{1}{seg}\right]$ durante 1 [min] para evaluar variación de tensión de fluencia.

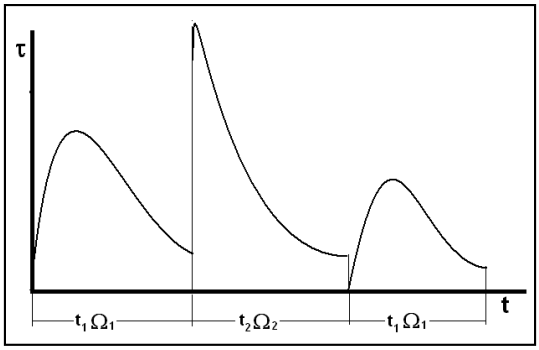


Figura 33 – Ensayo de triple intervalo. (Larenas 2010).

Otro antecedente interesante es el estudio desarrollado por Pornillos (2011). En este estudio se midieron las tasas de reducción en la tensión de fluencia en relaves espesados con floculante luego de aplicar un cizalle controlado.

Las muestras correspondían a relaves de cobre-oro de yacimientos peruanos. A diferencia de otros ensayos que utilizan el mismo reómetro para aplicar cizalle, se utilizó un taladro a 180[rpm] y una batidora a 950[rpm] instrumentalizados con un voltímetro y un amperímetro. Figura 34.

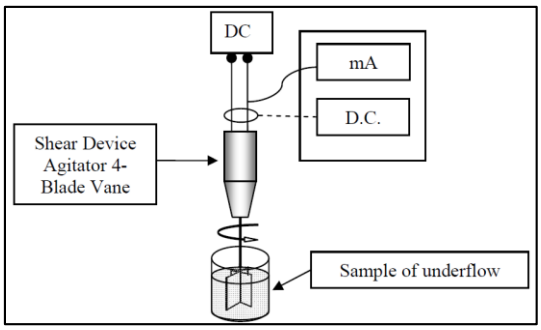


Figura 34 – Esquema de aparato cizallador. (Pornillos 2011).

Se observa que las grandes tensiones de fluencia se degradan, comparativamente, mucho más que las pequeñas, Figura 35.

La energía inyectada (y absorbida) tiene un efecto de carácter asintótico. Pasado cierto umbral, más energía no implica mayor disminución de la tensión de fluencia, Figura 36.

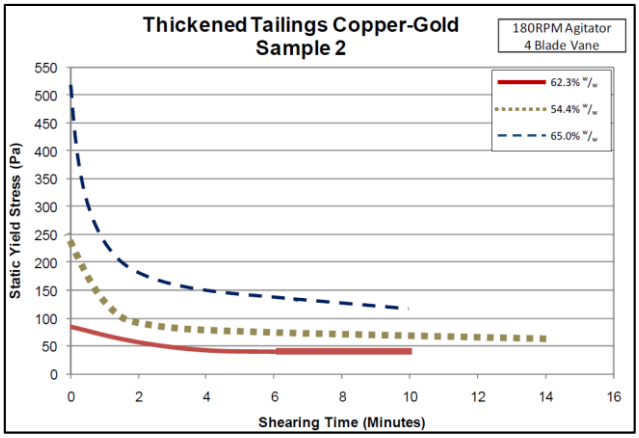


Figura 35 – Pérdida de tensión de fluencia con respecto a tiempo de cizalle. (Pornillos 2011).

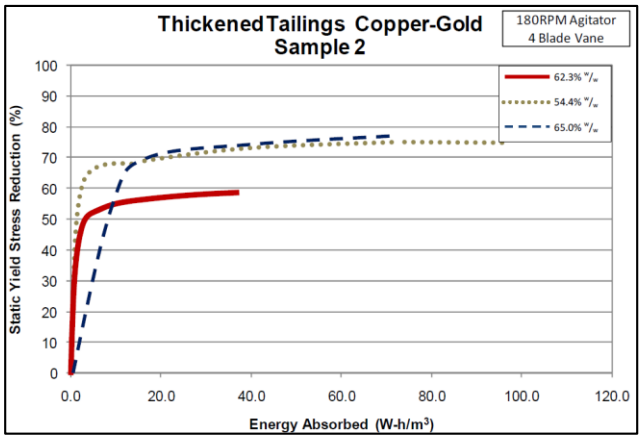


Figura 36 – Reducción de Tensión de fluencia con respecto a energía absorbida. (Pornillos 2011).

Sin embargo, no se especifica en el estudio si el agitador se mantuvo fijo con un bulbo de cizalle definido o fue desplazado arbitrariamente sobre la muestra.

Con respecto al cizalle de 950[rpm] se observó que mayores velocidades de giro no implicaban mayores disminuciones en la tensión de fluencia de la muestra.

10. Primer Ensayo Exploratorio.

Con el objetivo de aterrizar la experiencia de otras investigaciones a la realidad del laboratorio del Centro de Investigación de JRI (CI-JRI) y sus instrumentos, así como de los relaves chilenos, se decide realizar una serie de experimentos exploratorios. Para la medición de τ_f se aplicó la rutina oficial del CI-JRI, que consiste en aplicar a la muestra un giro de $\Omega = 0.1\left[\frac{1}{seg}\right]$ durante 60 [seg] (Larenas 2010).

Se preparó un compósito con 13 muestras remanentes de relaves correspondientes a un yacimiento en el norte de Chile de origen confidencial. Las muestras tienen 2 semanas de antigüedad.

10.1. Objetivos

- Comprender las capacidades y limitaciones del reómetro RheoStress 6000.
- Anticiparse a posibles artefactos en mediciones.
- Desarrollar pericia en manipulación de muestras y disminuir errores en manipulaciones definitivas.
- Probar distintas configuraciones de cizalle, y estimar rangos de aplicabilidad que cumplan con criterios de ensaye Vane (no deslizamiento, etc.).

10.2. Granulometría

A través del sistema de medición de granulometría láser, se evaluó la muestra obteniéndose los resultados expuestos en la Tabla 3 y el gráfico de la Figura 37:

Tabla 3 – Granulometría Muestra 1

D10	D50	D80
[µm]	[µm]	[µm]
5,0	49,2	155,5

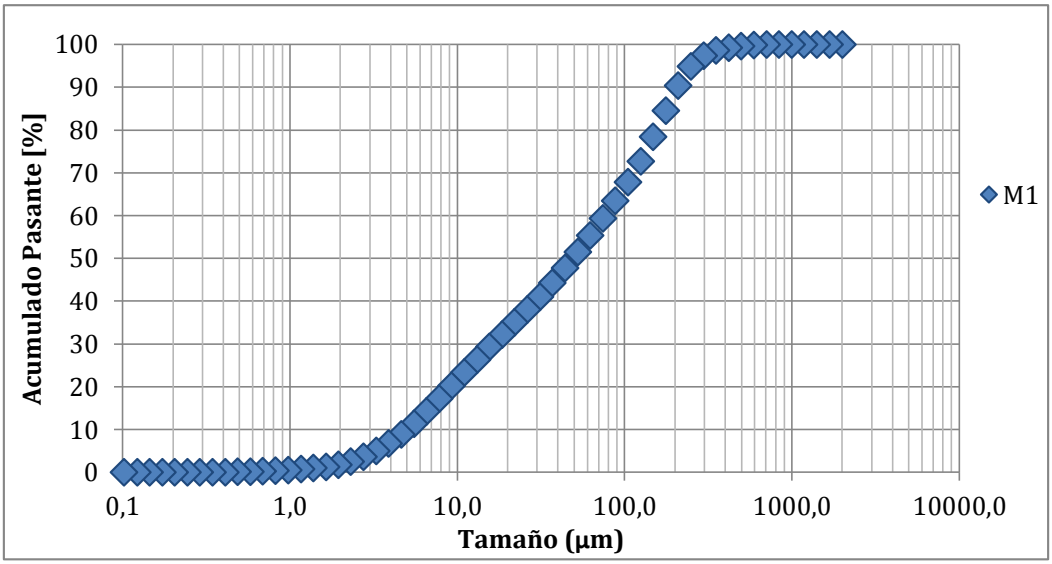


Figura 37 - Curva Granulométrica Muestra 1.

10.3. Densidad de Solidos

Para la obtención de la densidad de sólidos se utilizó el método del picnómetro. Los resultados se exponen en la Tabla 4.

Tabla 4 – Parámetros de Muestra 1

Parámetro	Original	Duplicado	Triplicado
Densidad del sólido [g/cc]	2,70	2,71	N/A
Resultado final [g/cc]	2,71±0,02		
Coeficiente de Variación (CV)	0,2%		

10.4. Concentración de Sólidos

Para la obtención de la concentración de sólidos se utilizó el método del vidrio reloj: se agrega una porción de la muestra en éste y se pesa antes y después de ser secado en una estufa. La diferencia de pesos indica la densidad inicial de la muestra.

Tabla 5 – Concentración de solidos de Muestra 1

ID muestra	Vidrio Reloj Vacío [g]	Vidrio Reloj con Muestra [g]	Vidrio Reloj con Muestra Seca [g]	Muestra [g]	Muestra Seca [g]	Cp [%]	Cp Promedio [%]	CV [%]
M1 Cp inicial original	34,31	57,32	49,72	23,01	15,41	66,97	**66,96**	0,0
M1 Cp inicial duplicado	33,78	60,05	51,37	26,27	17,59	66,96		

10.5. pH

Se midió el pH utilizando un pH-metro digital marca HANNA, entregando un valor de pH=8.4.

10.6. Procedimiento

Utilizando una paleta de madera, se mezcló el compósito hasta lograr una consistencia visualmente homogénea, sin grumos, aglomeraciones o sedimentos en el fondo. Figura 38.

Figura 38 – Balde con muestra y remo de mezclado

Desde este compósito se cortaron 4 muestras de 200[ml] cada una, volumen requerido para los ensayos de reología Vane.

Cada muestra fue cizallada a una velocidad fija, utilizando un sensor Vane FL22 (Figura 40), con la rutina de la Figura 39, repetida 4 veces:

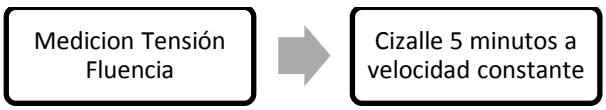


Figura 39 – Secuencia de ensayo.

Esto da un tiempo total de rutina de 30[min] (1[min] por cada medición y 5[min] por cada cizalle).

Se consideraron 4 velocidades distintas en pasos de 125[rpm]:

- 125[rpm]
- 250[rpm]
- 375[rpm]
- 500[rpm]

Estas velocidades fueron definidas considerando que otros ensayos aplican velocidades dentro de éste orden de magnitud (Vidal 2013), apuntando a conocer el comportamiento de las muestras en escenarios más energéticos.

Según la literatura especializada (Rheology Handbook – Mezger 2014) para que un fluido sea considerado tixotrópico, este debe mostrar una recuperación total de sus propiedades reológicas después de ser cizallado.

(…)However, such a material is not thixotropic if the initial structural strength does not completely return finally, even after an "infinitely" long period of time at rest. In this case a ***permanently remaining structural change*** *has taken place. If structural regeneration does not occur completely (i.e. to 100%), it is sometimes referred to as "incomplete" or "false" thixotropy. In this case, instead of "thixotropy" it is better to speak of "partial regeneration", e.g. expressed in a percentage compared to the initial viscosity value (…).*

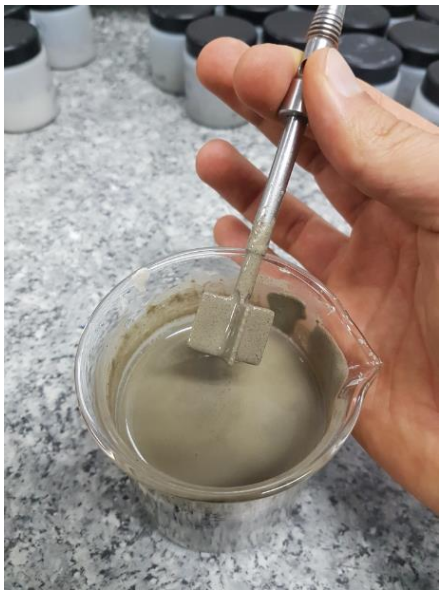


Figura 40 - Muestra después de ser ensayada.

10.7. Resultados:

En la Tabla 6 se resumen los resultados obtenidos de cizallar la muestra a distintas rpm.

Tabla 6 - Tensiones de fluencia a distintos cizalles.

RPM	Tensión de Fluencia τ_f [Pa]										
	0 [min]	Cizalle 5 [min]	5 [min]	Cizalle 5 [min]	10 [min]	Cizalle 5 [min]	15 [min]	Cizalle 5 [min]	20 [min]	Cizalle 5 [min]	25 [min]
125	41,5		47,3		43,4		40,9		39,3		38,4
250	42,3		56,1		54,5		53,4		53,3		53,5
375	41,6		55,9		56,2		55,4		55,5		56,3
500	41,6		48,3		47,0		45,9		45,3		45,3

En el gráfico de la Figura 41 se muestra la variación de la tensión de fluencia a distintos tiempos de cizalle.

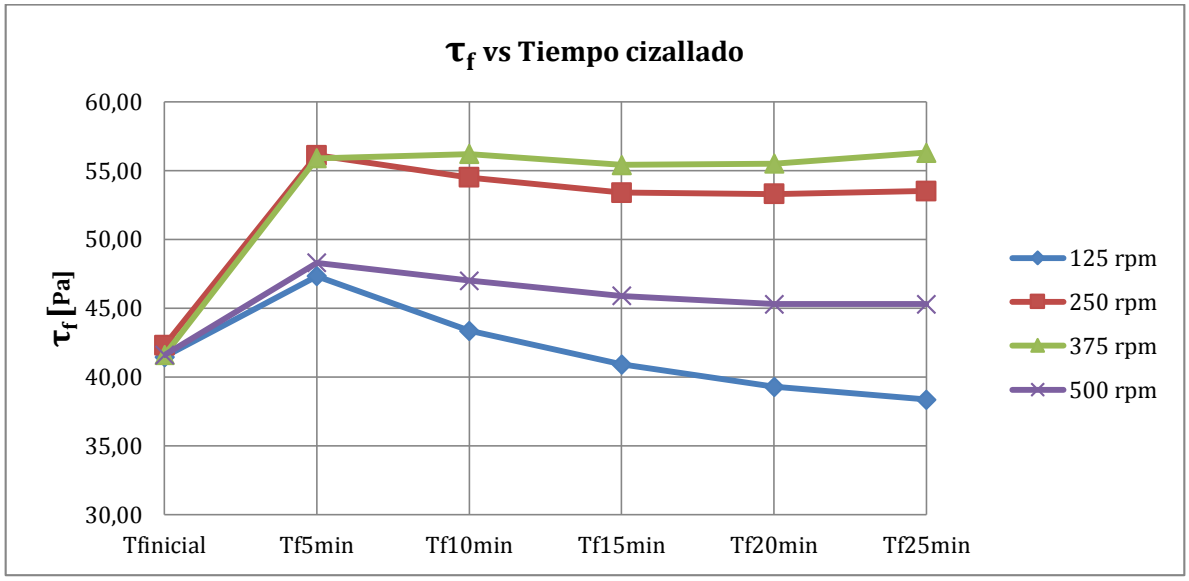


Figura 41 - Tensión Fluencia a distintos tiempos de cizalle.

Por lo tanto, se puede concluir que:

- Transitoriedad de tensión de fluencia antes de los 15 minutos de cizalle.
- Sin correlación directa entre rpm y variación de tensión de fluencia.
- Se observa que a baja velocidad, 125[rpm], la muestra presenta un posible comportamiento tixotrópico.
- A media velocidad, 250[rpm]-375[rpm], la muestra presenta un posible comportamiento reopéctico.
- Después de los 15[min] la muestra deja de ser relevantemente sensible al cizalle.

10.8. Análisis de errores en Ensayo Exploratorio 1

Debido a que en el primer ensayo se encontraron artefactos en los cambios de fase (valores negativos de torque al detener cizalle y comenzar medición de τ_f, Figura 42) se sospecha que la paleta Vane o la muestra mantiene cierta inercia que podría alterar las mediciones. Para desarrollar los nuevos ensayos que analizan estos errores, se ocupó el sobrante de la muestra M1 del Ensayo Exploratorio 1, manteniendo los valores de densidad, concentración, pH y granulometría.

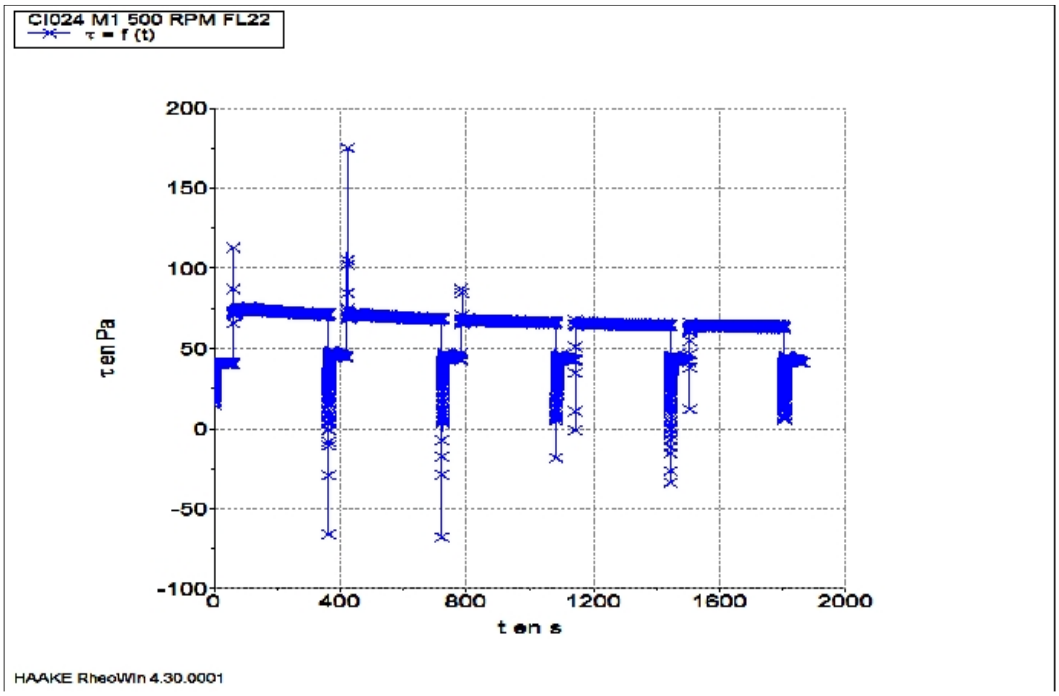


Figura 42 - Resultados directos de reómetro con valores negativos en cambio de etapa.

10.8.1. Objetivos

- Crear rutinas en equipo RheoStress 6000 que puedan medir inercia de fluidos.
- Estudiar el ruido por inercia de pulpa en transiciones de RPM utilizando la rutina más apropiada.
- Utilizar el protocolo estándar de 100[rpm] por 15 min y observar comportamiento de las muestras ensayadas anteriormente. Comparar resultados.

10.8.2. Procedimiento

Para crear la rutina de medición de inercia del fluido se utilizaron 200[ml] de agua potable a 18°C como fluido. Se crearon 2 rutinas distintas:

a) **Dejando el Vane con *giro restringido* después de la agitación** para medir momento.

Se agitó durante 60 segundos a 50, 75, 100, 125, 250, 375, 500, 625, 750, 875 RPM en un vaso precipitado con 200[ml] de agua a 18°C y luego se midió el tiempo en que el sensor sigue midiendo momento producto del flujo circundante. Los resultados se muestran en el gráfico de la Figura 43.

Se observó que para velocidades menores a 125[rpm] el equipo registra valores incoherentes con la tendencia, además de un umbral de velocidad, sobre el cual al seguir aumentándola, no se logran mayores tiempos de inercia. Al descartar los valores mínimos y máximos se observa un mejor ajuste a una tendencia lineal, como se observa en el gráfico de la Figura 44.

Se concluye que el torque por inercia es directamente proporcional a las RPM aplicadas, no así la duración de este: bajo 125[rpm] los tiempos de duración del torque son en torno a los 11 segundos, y sobre 625[rpm] son en torno a los 30 segundos. Tabla 7.

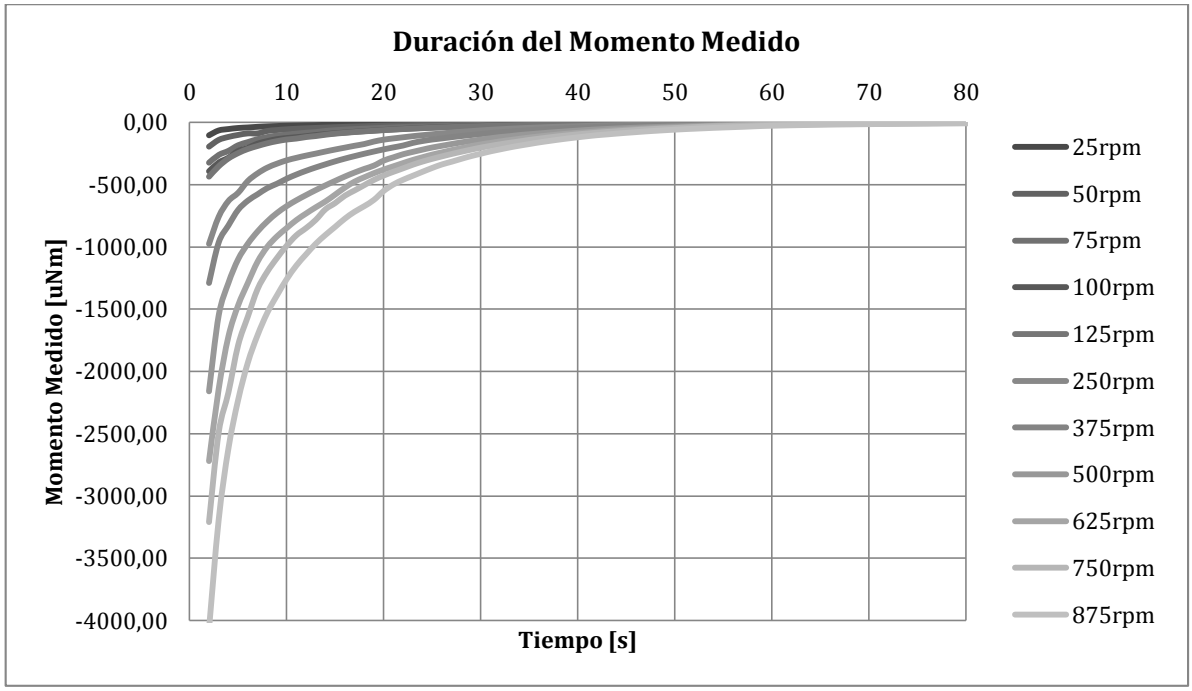


Figura 43 – Inercia de Agua y momento medido.

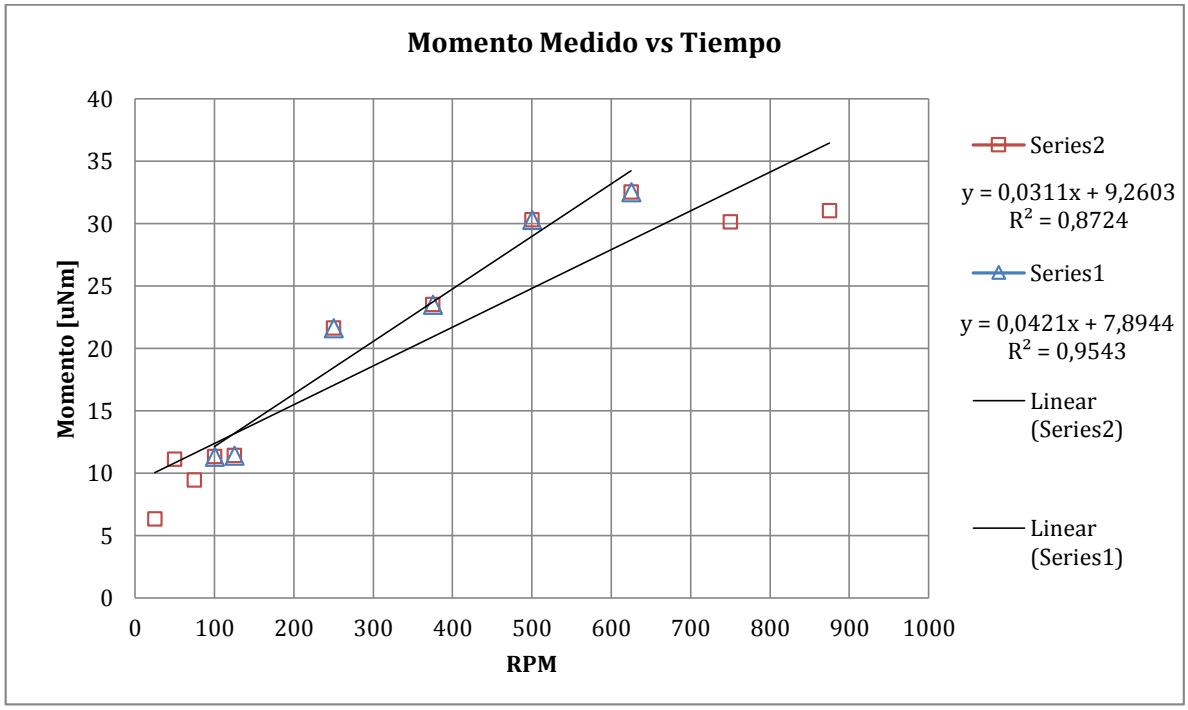


Figura 44 - Mejor ajuste con y sin valores extremos.

Tabla 7 - Tiempo hasta el cese de mediciones.

RPM	25	50	75	100	125	250	375	500	625	750	875
Segundos	6,3	11,1	9,40	11,30	11,40	21,60	23,50	30,30	32,50	30,10	31,00

b) Dejando el Vane con *giro libre* después de la agitación, esperando medir giro.

Se creó una rutina donde se aplica 60 segundos de giro a distintas RPM y luego se espera hasta que el sensor Vane deje de girar, como se observa en el gráfico de la Figura 45. Los tiempos al reposo se muestran en la Tabla 8 y gráfico de la Figura 46.

Esta rutina se aplicó al rango inferior que presentaba problemas de lectura en sistema de Giro Restringido: 25, 50, 75 y 125 RPM.

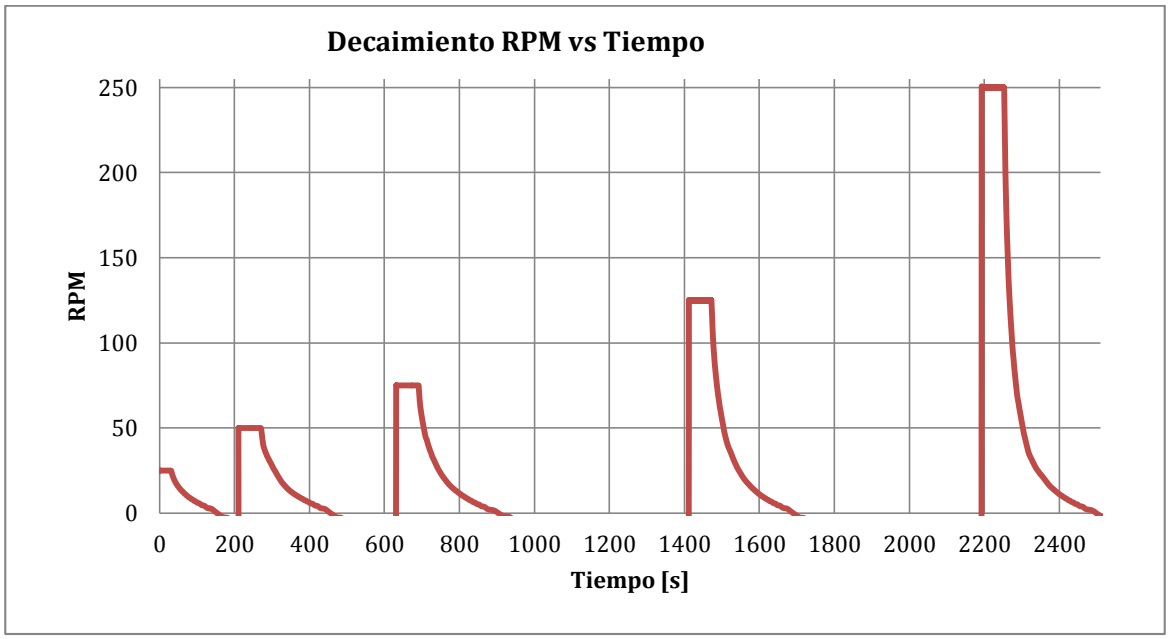


Figura 45 - Decaimiento de giro libre Vane en agua.

Tabla 8 - Tiempo a la detención del giro libre del sensor Vane.

RPM	Tiempo a la detención [s]
25	122
50	184
75	210
125	216

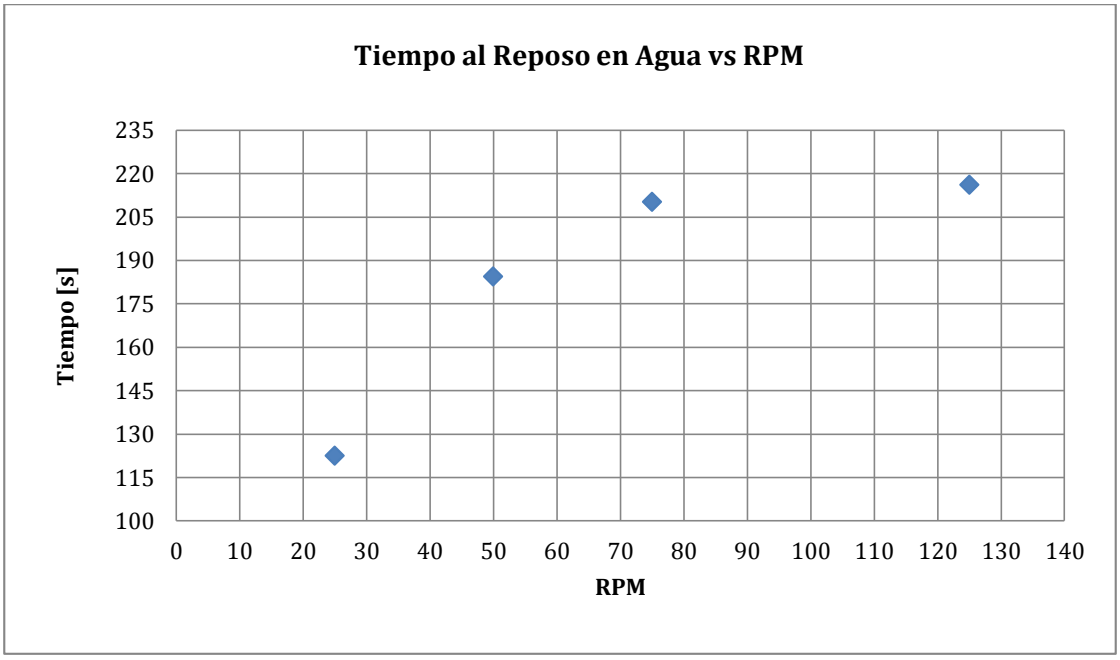


Figura 46 - Tiempo al reposo – Giro libre en agua.

10.8.3. Resultados

Se desarrollaron dos rutinas para medir cómo la inercia de la pulpa podría alterar las mediciones reológicas: giro libre y giro restringido. El giro restringido se comporta bien en el rango de 100[rpm] a 625[rpm], siendo inexacto en otros rangos. El giro libre presenta menos dispersión en los datos analizados comparado con el giro restringido. Por lo tanto, se aplica la rutina de Giro Libre en las mediciones de inercia de relaves.

En el gráfico de la Figura 47 se observa que en todos los casos en relaves (125, 250, 375, 500 y 625 RPM) el tiempo al reposo (en giro libre) no supera los 2[s].

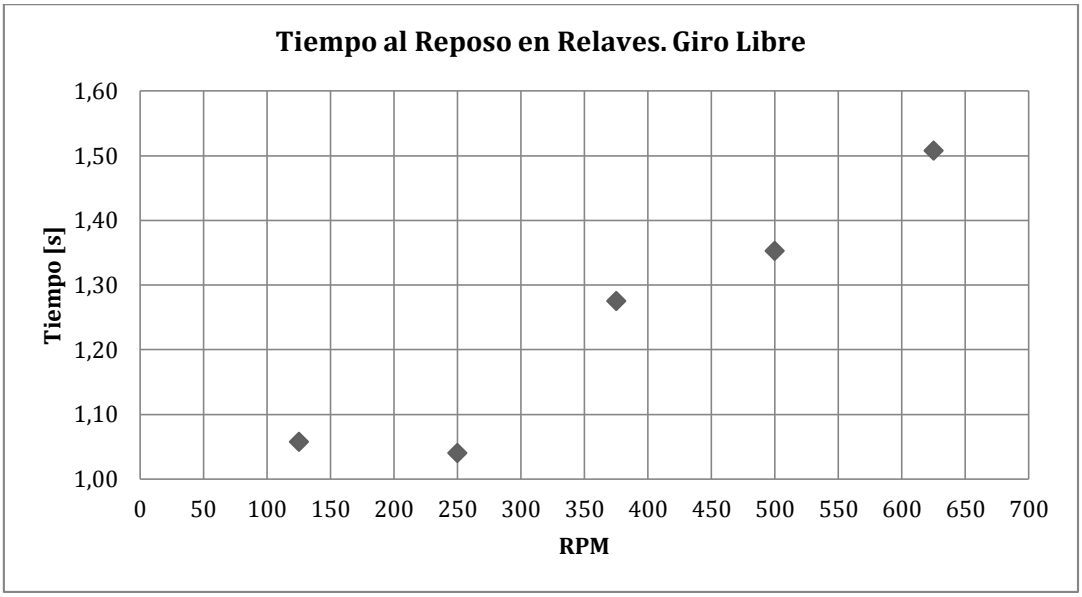


Figura 47 - Tiempo al reposo en relaves.

Se propone hacer una pausa de 5[s] antes de iniciar la medición de Tensión de Fluencia (método con duración de 60[s]). Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 – Interferencia real de inercia en la medición de τ_f.

Muestra	$\tau_{f\,1}$ [Pa]	$\tau_{f\,2}$ [Pa]	Variación %	Variación Promedio %
M3 Sin Reposo Original	42,6	39,0	8,5	8,1
M3 Sin Reposo Duplicado	42,9	39,6	7,7	
M3 Con Reposo Original	42,2	38,6	8,5	8,2
M3 Con Reposo Duplicado	41,9	38,6	7,9	

Se observa una diferencia de 0.1% entre el método con 5[s] de reposo y el estándar. Se descarta la hipótesis que la inercia del sensor Vane afecte las mediciones de tensión de fluencia.

Para ensayos posteriores no se aplicará este reposo de 5[s] entre mediciones.

11. Segundo Ensayo Exploratorio

Considerando que en Chile el transporte de relaves ocurre en concentraciones de sólidos desde 30% hasta 70% aproximadamente, resulta útil realizar ensayos con al menos 3 escenarios de distintas concentraciones.

11.1. Preparación de muestras.

Se considera el uso de 12 muestras de relave por cada concentración (3 concentraciones de sólidos distintas), para su correspondiente ensayo de reología Vane (72 ensayos).

Antes de ser ensayado el relave se seca en una estufa a 60ºC hasta que no exista una diferencia de peso mayor a 0.5[g] durante el secado. Figura 48.

Luego de ser secada, la muestra es disgregada con cuidado, además de descartar la fracción mayor al tamiz #40. Figura 49.

Para el repulpeo de la muestra, se agrega agua potable hasta la tensión de fluencia definida con anterioridad (baja, media o alta).

Se disponen en vasos precipitados de 250[ml] de vidrio. A cada vaso se le agrega 200[ml] de muestra, como se observa en la imagen de la Figura 50. Es importante que los vasos queden bien tapados con algún tipo de film para evitar la evaporación de agua, que aumentaría indeseablemente la concentración de la muestra.

Antes de ser ensayadas, cada muestra es homogenizada envolventemente con una cuchara para disolver grumos o sedimentos al fondo del vaso.

Figura 48 - Estufa de secado.

Figura 49 - Disgregado de muestra en Tamiz #40.

Figura 50 - 12 muestras para su correspondiente ensayo.

11.2. Ensayo

Figura 51 - Muestra en Reómetro.

La muestra ya homogenizada se instala en el reómetro, Figura 51, para ser ensayada con la rutina que se observa en la Figura 52 y a las RPM de la Tabla 10.

Figura 52 - Protocolo estándar de cizalle sensor Vane.

Tabla 10 – RPM de ensayo.

RPM a ensayar
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500
550
600

11.3. Parámetros a medir

1) **Granulometría:** Para este ensayo es necesario a lo menos 20[g] de muestra seca. La medición es vía "Granulometría Laser", con el equipo "Microtrac S3500". Figura 53.

Figura 53 - Sistema de granulometría laser

2) **pH:** Obtenido a través de un pH-metro digital.

3) **Concentración de sólidos (Cp):** Se pone un poco de muestra en un vidrio reloj que posteriormente se seca en una estufa. El valor se obtiene por diferencia de pesos. Figura 54.

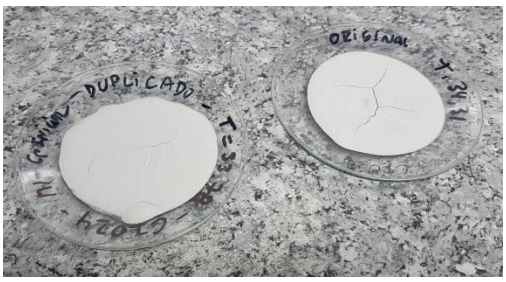


Figura 54 - Vidrio Reloj con muestras para cálculo de Cp

4) **Tensión Fluencia:** Se toman 200[ml] que van directo al reómetro. En caso que la tensión este fuera del rango esperado se agrega o quita agua según sea el caso.

Para este ensaye se tomaron 2 muestras de relave de una minera del norte grande de Chile (de origen confidencial), con bajo contenido de arcilla. La muestra se encontraba en un barril de 200 litros y se tomó una muestra del fondo (denominada M8) y otra superficial (denominada M7). Cada una se dividió en 3 grupos según concentraciones (baja, con tensión de fluencia cercana a los 17 pascales; media, con tensión de fluencia cercana a 28 pascales y alta, con tensión de fluencia cercana a los 58 pascales.), y cada concentración en otras 12 muestras más según velocidad a ensayar (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 y 600 RPM). Estas velocidades fueron definidas semejantes a los ensayos de reología tomados de referencia (Vidal 2013) y expandidas con el objetivo de distinguir el efecto en el comportamiento ante el cizalle.

Los gráficos están construidos para expresar la variación porcentual de la tensión de fluencia después de ser cizallada la muestra; valores negativos indican un posible comportamiento tixotrópico, valores positivos un posible comportamiento reopéctico.

11.4. M7

La muestra M7 fue secada y luego repulpeada a tres concentraciones distintas (Cp=71,86%, 72,92% y 74,27%). Cada una separada en 12 vasos precipitados con 250[ml] de muestra en cada uno de ellos. Tal como se menciona en el protocolo de ensayo, cada muestra fue cizallada a una velocidad distinta.

Se observa en el gráfico de la Figura 55:

- Al aumentar la velocidad de cizalle las curvas presentan un comportamiento lineal y creciente.
- Al aumentar la concentración de sólidos las curvas se desplazan hacia abajo, dominando el posible comportamiento tixotrópico.
- A velocidades superiores a 500[rpm], la muestra no mantiene el comportamiento lineal y creciente.

11.5. M8

La muestra M8 fue secada y luego repulpeada a tres concentraciones distintas (Cp=72,31%, 72,81% y 74,41%). Cada una separada en 12 vasos precipitados con 200[ml] de muestra en cada uno de ellos. Tal como se menciona en el protocolo de ensayo, cada muestra fue cizallada a una velocidad distinta.

Se observa en el gráfico de la Figura 56:

- Al aumentar la velocidad de cizalle las curvas presentan un comportamiento lineal y creciente.
- Al aumentar la concentración de sólidos las curvas se desplazan hacia abajo, dominando el posible comportamiento tixotrópico.
- A velocidades superiores a 400[rpm], la muestra no mantiene el comportamiento lineal y creciente.

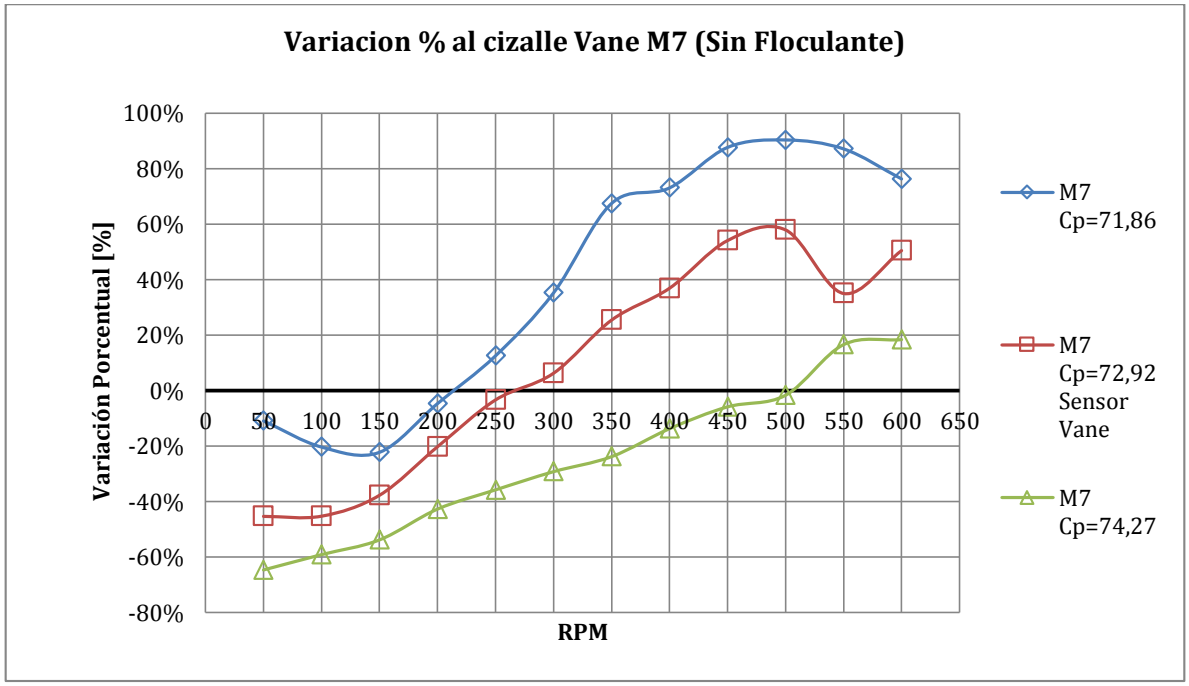


Figura 55 - Variación Porcentual cizalle sensor Vane M7.

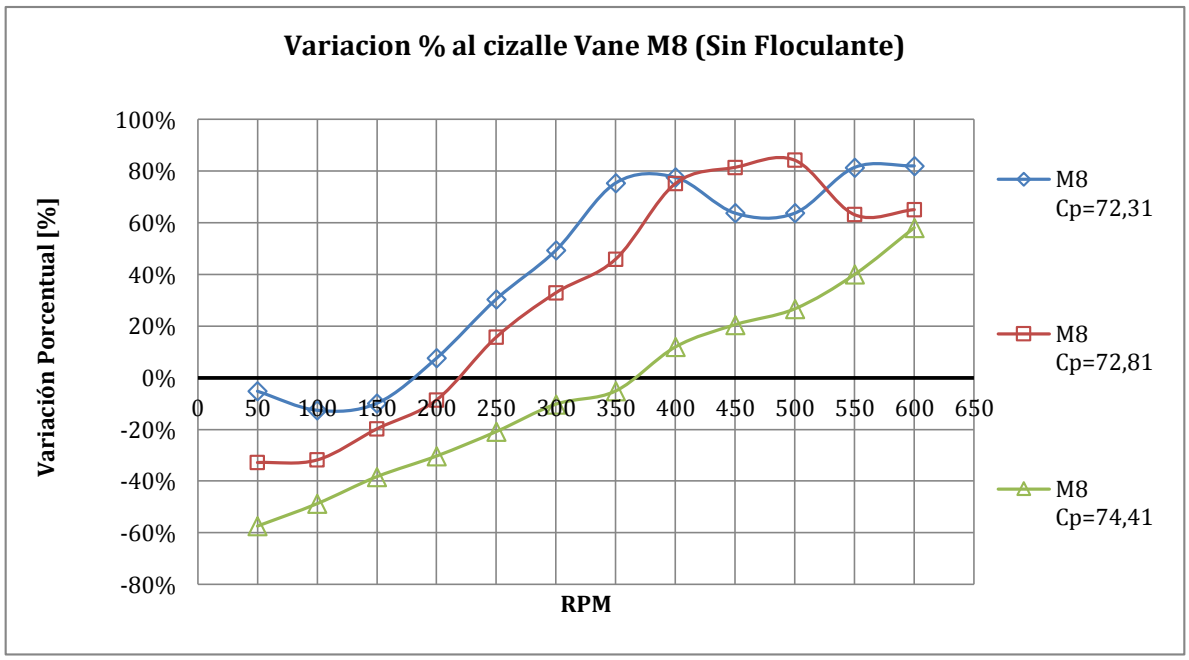


Figura 56 – Variación Porcentual cizalle sensor Vane M8.

11.6. Resumen resultados muestras M7 y M8

Se observa inestabilidad en los resultados después de las 500[rpm], es decir, se pierde la linealidad creciente presentada a velocidades inferiores, mostrando un comportamiento de difícil predicción. En el gráfico de la Figura 57 se realiza un análisis comparativo del comportamiento de ambas muestras, considerando ensayos de cizalle en el rango de 50 a 500[rpm].

Al aumentar la concentración de sólidos o velocidad de cizalle, la muestra pasa de una variación porcentual (de tensión de fluencia) negativa a una positiva. Los rangos de comportamiento son específicos para cada muestra, no pudiéndose dar un umbral universal exacto.

Los parámetros característicos como pH, granulometría, tensión de fluencia inicial y concentración de solidos se resumen en la Tabla 11.

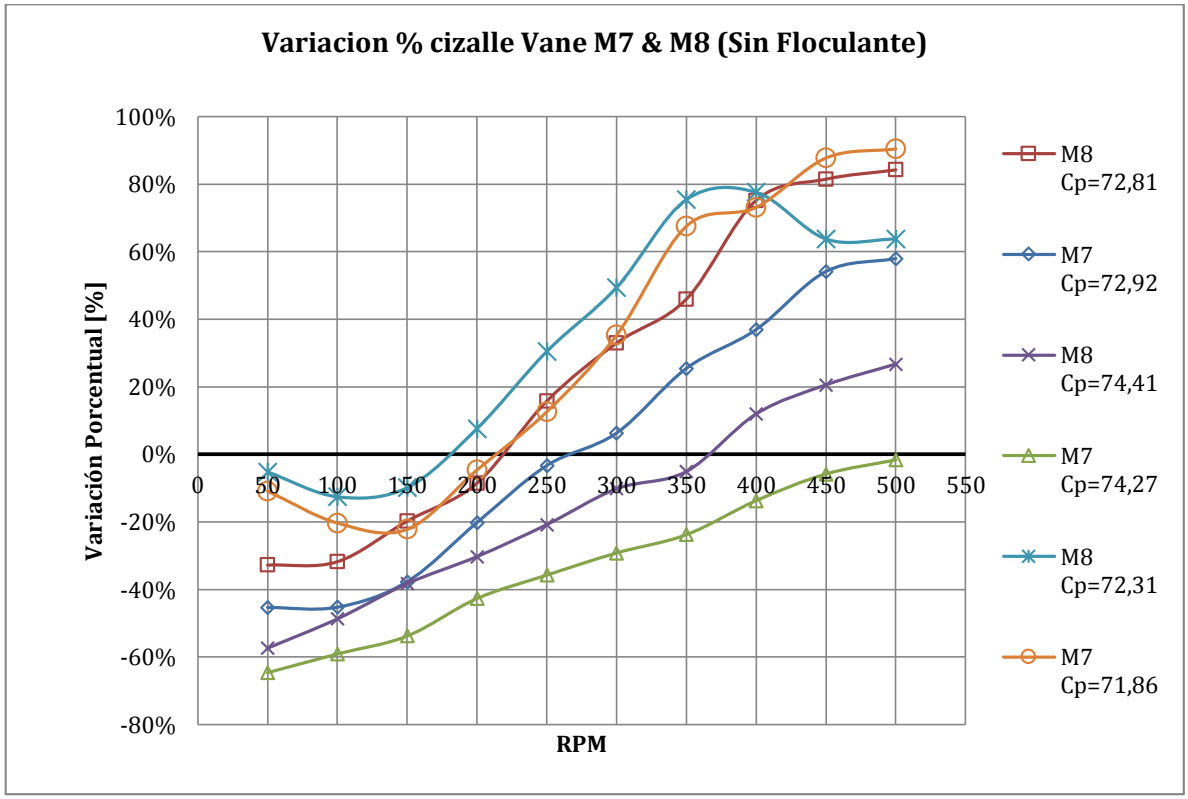


Figura 57 - Resumen M7 y M8

Tabla 11 -Resumen características muestras M7 y M8.

Parámetro	M7			M8		
Cp Promedio [%]	71,86	72,92	74,27	72,31	74,41	72,81
τ_f [Pa]	16,8	29,1	61,4	16,9	25,9	54,5
D10 [µm]	5,41			5,17		
D50 [µm]	45,87			45,05		
D80 [µm]	138,1			143,95		
pH	8,06	8,03	8,09	8,18	8,20	8,18

11.7. Análisis de los datos

Considerando la experiencia en industria y de investigaciones como la de Pornillos (2011) resulta inesperado un aumento de la tensión de fluencia al aplicar altas RPM a la muestra. Lo esperado es un comportamiento inverso es decir, a mayores RPM menores valores de tensión de fluencia. Para explicar estos resultados, se plantean dos posibles hipótesis: sedimentación y efectos centrífugos.

La sedimentación podría existir como consecuencia del tiempo que dura el ensayo. En los 15 minutos que dura el cizalle, parte de la muestra se depositaría en el fondo. Que tan pronunciado sea este efecto depende de factores específicos de cada muestra, como concentración de sólidos o banda granulométrica.

La sedimentación dependería de la velocidad de cizalle aplicada y la concentración de la muestra. En muestras más diluidas el material sedimentado podría ser resuspendido por efecto del cizalle aplicado o incluso no existir sedimentación.

En el caso de existir las condiciones para una sedimentación, se depositaría una porción de los sólidos en el fondo del recipiente, dejando la muestra más diluida en la zona de medición del sensor Vane, como se ejemplifica en la Figura 58. A menor concentración, menor es la tensión de fluencia (Fuentes 2011).

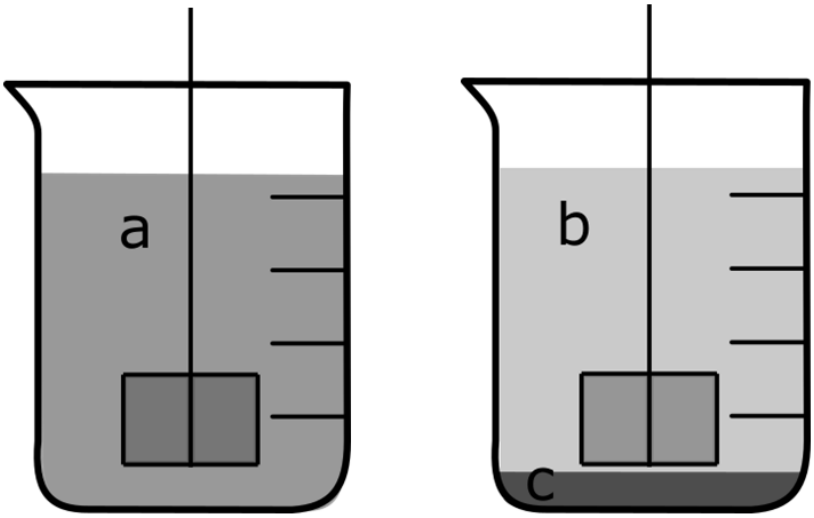


Figura 58 – Posible Efecto de Sedimentación.

Donde

$$\tau f_c > \tau f_a > \tau f_b$$

La segunda hipótesis planteada son efectos centrífugos. Cuando el giro aplicado para generar cizalle es lo suficientemente rápido, en la muestra podría generar una separación radial. A mayores RPM, mayor efecto centrífugo y mayor probabilidad de separar partículas finas de gruesas. Las partículas gruesas serían desplazadas a las zonas radiales distales y las partículas finas quedarían en la zona próxima de medición del sensor Vane. Esto afectaría las mediciones debido a que las partículas finas generan una mayor tensión de fluencia que sus equivalentes gruesas (Fuentes 2011).

En el gráfico de la Figura 57 se observa un umbral límite de velocidad (específico para cada concentración) que divide posibles fenómenos tixotrópicos o reopécticos.

A bajas velocidades la energía no sería suficiente para resuspender la muestra, depositándose material en el fondo del recipiente y disminuyendo la concentración, ergo, la tensión de fluencia en la zona de medición del sensor. Al aumentar la velocidad, aumentaría la resuspensión hasta superar el umbral de "tixotropía". En pulpas menos concentradas la zona tixotrópica sería menor debido a la mayor facilidad de régimen turbulento y resuspensión de la muestra. En pulpas con altas concentraciones de sólidos el sensor Vane no podría resuspender la muestra, registrando variaciones "tixotrópicas".

Al aumentar la velocidad posibles efectos centrífugos y turbulentos comenzarían a ocurrir: segregación radial de partículas gruesas aumentarían la tensión de fluencia. En pulpas menos concentradas domina el fenómeno "reopéctico".

Debido al alcance de esta memoria, a futuro sería interesante desarrollar experimentos específicos que expliquen estos comportamientos observados, como por ejemplo, tomar muestras de distintas zonas del recipiente (tanto vertical como radial) y someterlas a ensayos de densidad y granulometría.

Estas observaciones plantearían un problema de artefactos con el método en sí mismo. Además, debido a que la esencia misma del método Vane es la nula interacción con las paredes del recipiente (Sofra et al. 2007), siempre existirá una porción de la muestra sin cizalle que al momento de homogenizar para evaluar con algún otro método (cilindro y copa por ejemplo), la porción no cizallada ponderaría valores erróneos en la medición de los parámetros en estudio (tensión fluencia o viscosidad).

12. Propuesta de nuevo método

Con el objetivo de subsanar los artefactos del cizalle con sensor Vane FL22, se propone el uso de un sensor que permita un cizalle convectivo al total de la muestra. Este sensor sólo se utilizará para generar el cizalle, debido a la efectividad comprobada en medición de tensión de fluencia del sensor Vane.

Fasano (2015) menciona que la mayoría de los fluidos de alta viscosidad son reológicamente complejos y requieren elementos especiales para una mezcla o cizalle eficaz. Un tipo de impulsor para este propósito, es el de cinta helicoidal, que se muestra en la Figura 59. Este tiene la característica de generar flujos convectivos que ayudan a mantener la muestra homogénea aun en altas concentraciones.

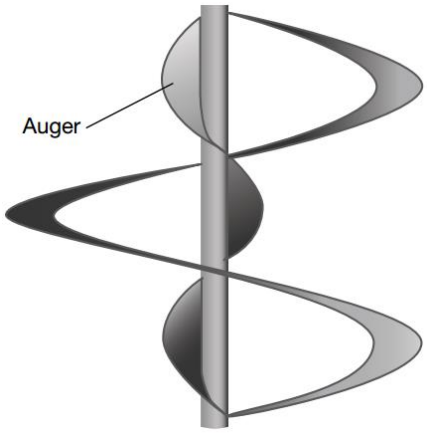


Figura 59 - Impulsor con tornillo central. (Fasano 2015)

En el área de alimentos son muy utilizados cuando es necesario mezclar líquidos muy espesos como granizados o con riesgo de sedimentación como jugos naturales. Figura 60 y Figura 61.

Figura 60 - Maquina Mezcladora de Jugos.

Figura 61 – Granizadora.

12.1. Pruebas sin floculante.

12.1.1. Sensor Helicoidal

Considerando los antecedentes recién señalados se realizaron ensayos a 5 velocidades distintas con la rutina de la Figura 62:

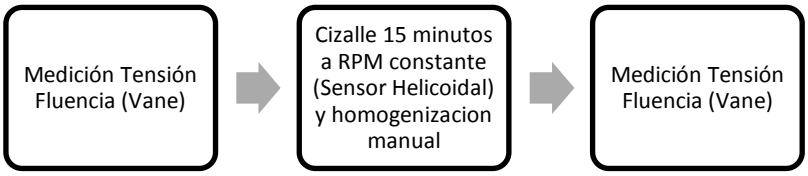


Figura 62 - Protocolo cizalle Helicoidal.

Se ensayaron las muestras a 100, 200, 300, 400 y 500 RPM. Como se aprecia en el gráfico de la Figura 63, al observar los resultados ninguna mostró comportamiento tixotrópico. Todas aumentaron levemente su tensión de fluencia. Para explicar estos resultados se plantea la hipótesis de diferencias en la homogenización entre ambos métodos. Antes de ensayar las muestras, son homogenizadas manualmente con una cuchara o paleta, pudiendo no ser completamente efectiva. Al aplicar cizalle con el sensor Helicoidal completaría esta homogenización, que posteriormente reflejaría el verdadero valor de tensión de fluencia de la muestra.

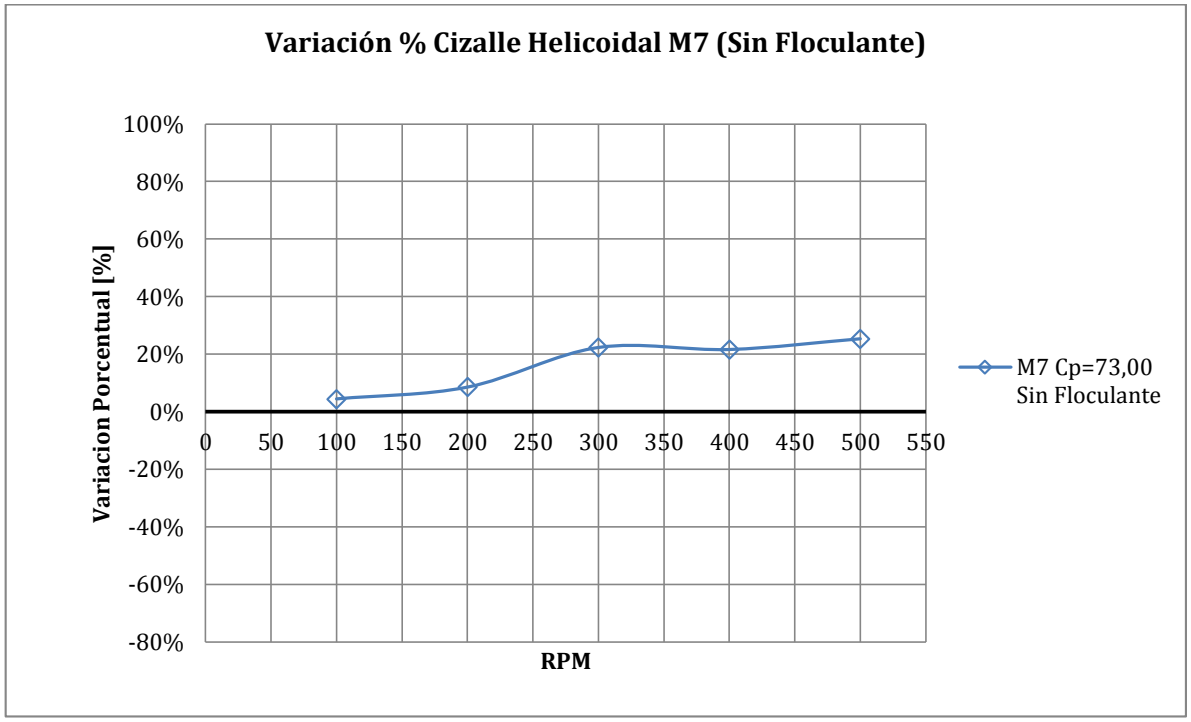


Figura 63 - Variación porcentual de tensión de fluencia al aplicar cizalle con sensor Helicoidal.

Tabla 12 - Valores de tensión de fluencia al aplicar cizalle externo

M7 Cp=73 Sin Floculante				
Muestra [rpm]	**1er τ_f [Pa]**	**Cizalle [min]**	**2do τ_f [Pa]**	**% variación**
100	35,9	15	37,5	4,46%
200	33,9		36,8	8,55%
300	33,6		41,1	22,32%
400	33,3		40,5	21,62%
500	36,7		46,0	25,34%

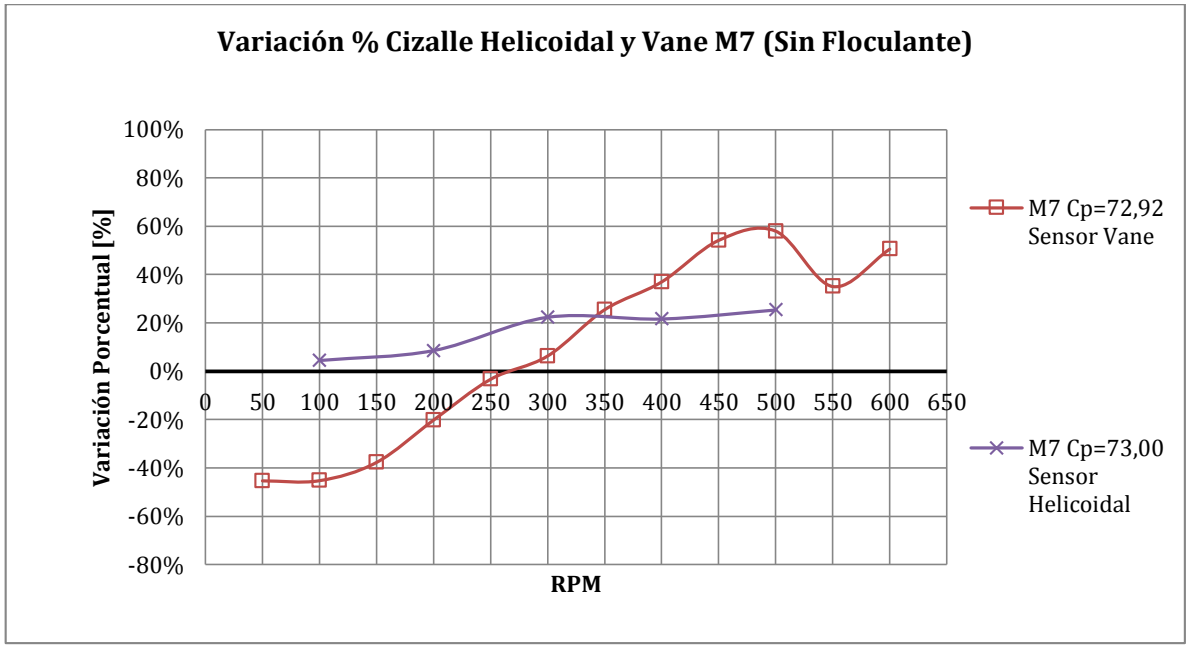


Figura 64 – Variación Porcentual cizallando con Vane y Helicoidal.

En el gráfico de la Figura 64 se presentan en comparativa los resultados obtenidos con el sensor Vane y con el sensor Helicoidal en condiciones de granulometría y concentración similares. La principal diferencia entre métodos es que con el sensor Helicoidal no existe una disminución de la tensión de fluencia.

12.2. Pruebas con floculante

Debido a que en la industria los relaves son tratados con floculante como método de recuperación de agua, es menester realizar los ensayos bajo esta condición industrial. Se procede a realizar una comparación del sensor Helicoidal versus Vane en condiciones de pulpa con floculante. Se consideró una dosis de 15[g/ton] de floculante ORIFLOC AP2020.

Se utilizó la misma técnica anterior (Figura 62) a 5 velocidades distintas: 100, 200, 300, 400 y 500 RPM.

12.2.1. Sensor Vane

Los resultados de los ensayos con sensor Vane y floculante se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 - Variación de tensión de fluencia con sensor Vane y floculante.

M8 Vane Cp=70,7				
Muestra [rpm]	**1er τ_f [Pa]**	**Cizalle[min]**	**2do τ_f [Pa]**	**% variación**
100	25,3	15	20,3	-19,76%
200	27,3		20,4	-25,27%
300	28,5		26,7	-6,32%
400	26		37,8	45,38%
500	25,3		33,5	32,41%

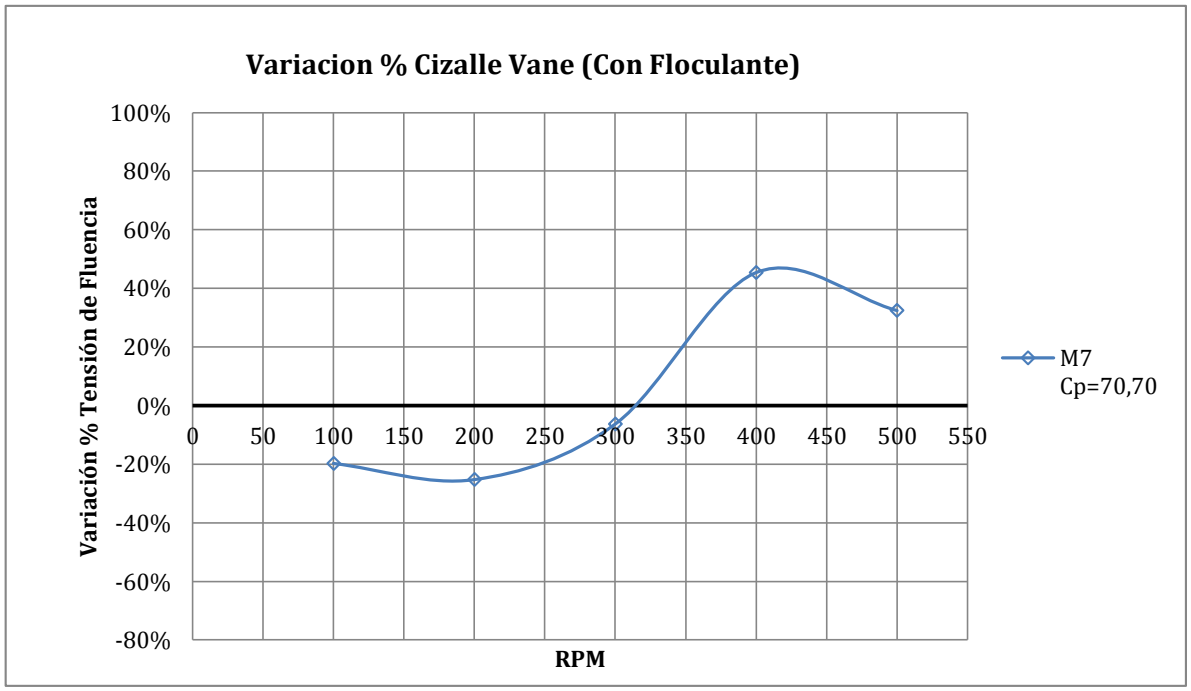


Figura 65- Variación porcentual de tensión de fluencia al aplicar cizalle con sensor Vane; Muestra M7; Floculante en dosis 15[g/t].

En el gráfico de la Figura 65 se muestra la variación porcentual de la tensión de fluencia al aplicar cizalle con el sensor Vane. Este comportamiento es similar al observado en condición sin floculante: bajas RPM tiende a disminuir la tensión de fluencia, altas RPM tiende a aumentar la tensión de fluencia.

12.2.2. Sensor Helicoidal

La esencia del sensor tipo Helicoidal es la capacidad de poder aplicar un cizalle controlado y homogéneo en muestras concentradas y/o con altos valores de viscosidad.

Los resultados de medición de tensión de fluencia se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14 - Variación de tensión de fluencia cizalle sensor Helicoidal.

M7 Helicoidal Cp=70,7				
Muestra [rpm]	**1er τ_f [Pa]**	**Cizalle[min]**	**2do τ_f [Pa]**	**Variación [%]**
100	25,9	15	18,4	-28,96%
200	26,0		15,3	-41,15%
300	25,2		15,0	-40,48%
400	27,6		18,0	-34,78%
500	25,9		16,6	-35,91%

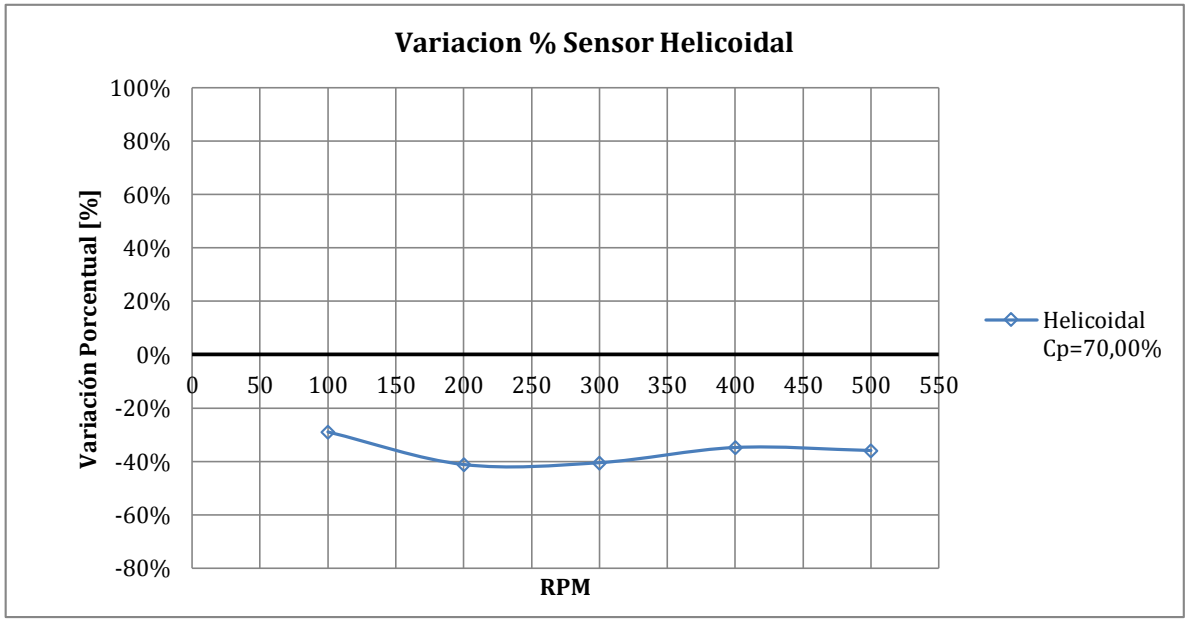


Figura 66 - Variación porcentual de tension de fluencia con sensor Helicoidal; Muestra M7; Floculante en dosis 15[g/t] .

En el gráfico de la Figura 66 se muestra la variación porcentual de la tensión de fluencia al aplicar cizalle con el sensor Helicoidal. Al utilizar floculante se obtuvieron resultados diferentes a cualquiera de los anteriores: disminución de la tensión de que aumenta con la velocidad de giro con un posible umbral tope en el rango analizado.

12.2.3. Comparación de Métodos: Vane y Helicoidal

En el gráfico de la Figura 67 se muestran ambos comportamientos: cizalle con sensor Vane y Helicoidal.

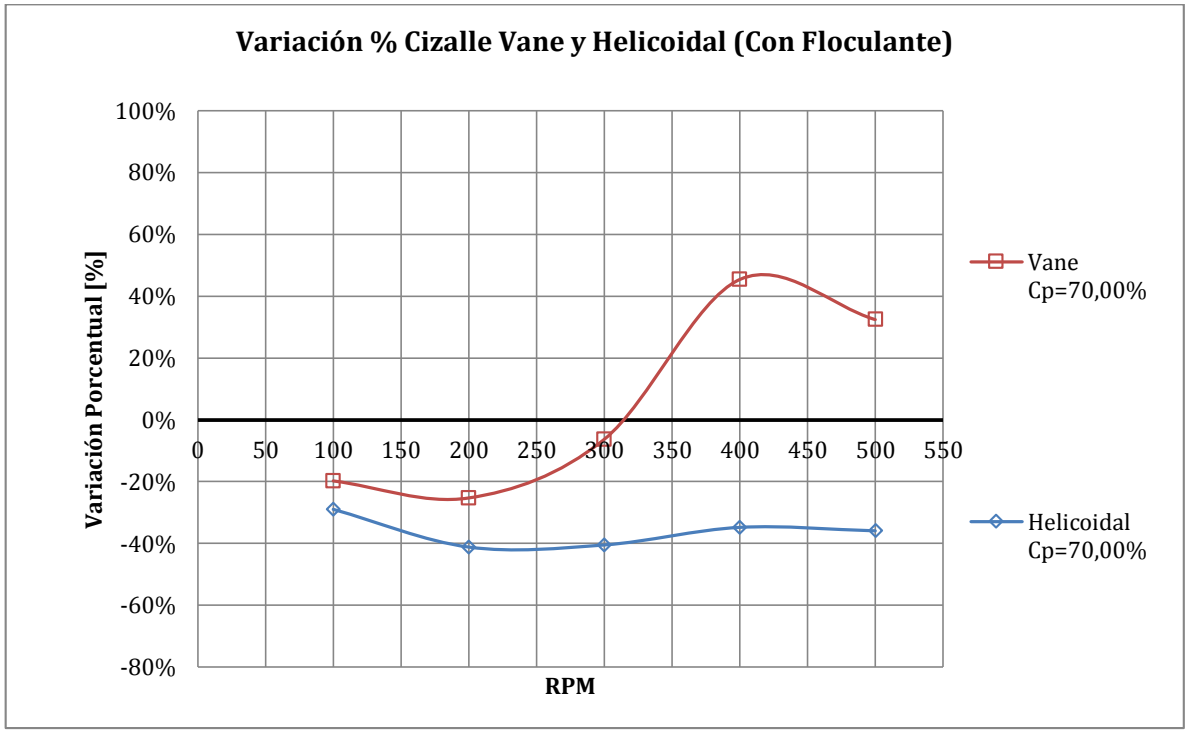


Figura 67 - Comparación de Cizalle Vane y Helicoidal Con Floculante Dosis 15[g/t]

Los datos obtenidos con el sensor Helicoidal son consistentes con lo esperado en otros estudios (Pornillos 2011) donde se aplica cizalle a una muestra con floculante y esta reduce su tensión de fluencia proporcional a la cantidad de energía inyectada con un umbral tope. La explicación a este fenómeno sería una posible destrucción de los enlaces generados por la adición del floculante. Químicamente los floculantes son cadenas de polímeros de longitud variable que enlazan coloides y partículas suspendidas, realizando madejas de la sustancia que aumentan su capacidad de decantación (y su evidente uso para recuperación de agua industrial en minería). La longitud de estas cadenas es definida por el fabricante, asociado al proceso químico de producción del mismo. Figura 68.

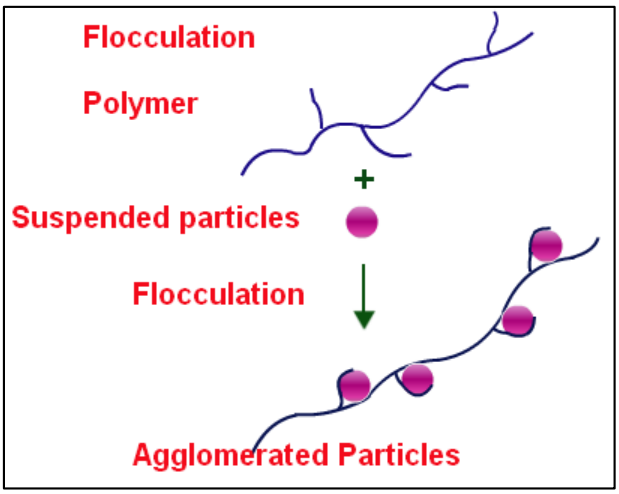


Figura 68 - Representación simplificada del proceso de floculación (Fitzpatrick 2004).

Fitzpatrick (2004) analizó la ruptura de flóculos puros a distintas tasas de cizalle, concluyendo que en todos los casos estos nunca recuperan su tamaño original. Este estudio respaldaría la hipótesis anteriormente presentada, que una vez que los flóculos con relave son destruidos con cizalle, la tensión de fluencia disminuiría sin capacidad de recuperación a valores iniciales.

13. Ensayo definitivo con nuevo método.

Luego de haber realizado distintas pruebas con distintos sensores, se concluye que la mejor forma de evaluar las propiedades reológicas de un relave, y en detalle su respuesta al cizalle, es utilizar dos sensores con características específicas para cada fin: un sensor con amplia validación en la medición de tensiones de fluencia (**sensor Vane**) y otro para la aplicación de cizalle (**sensor de cinta Helicoidal**). Los ensayos contemplan muestras con y sin floculantes. Se utilizará una dosis de floculante 15[g/t] ORIFLOC AP2020.

Estas muestras de relave fueron tomadas de la faena de Minera Escondida antes de entrar a espesamiento, sin adición previa de floculantes. Desde esta muestra se preparan 8 muestras, descritas a continuación.

- **Cp=65%**
    - Con floculante (CF)
        - Original
        - Duplicado
    - Sin floculante (SF)

        - Original
        - Duplicado

- **Cp=55%**
    - Con floculante (CF)
        - Original
        - Duplicado
    - Sin floculante (SF)
        - Original
        - Duplicado

El protocolo de ensayo a aplicar busca **evaluar la variación de tensión de fluencia al cizalle** y **su evolución en el tiempo**.

Esta idea se vincula a la industria minera por la incertidumbre que existe aguas abajo en transporte de relaves después de pasar por sistemas de bombeo: los relaves después de salir de los estanques de espesamiento (para recuperación de agua) son intensamente cizallados por efecto de las bombas centrífugas, y en menor medida, cizallados por efecto de la turbulencia en la conducción hidráulica hasta su disposición. El protocolo que podría representar esta situación se detalla en la Figura 69.

El tiempo para medir la evolución de la tensión de fluencia post cizalle fue acotado a 2 horas, tiempo similar a las conducciones de corta distancia para disposición de relaves. Durante estas 2 horas se mantuvo un mínimo giro del sensor Helicoidal (sólo un 6,6% de la velocidad usada para el cizalle) que simularía las condiciones de transporte en tubería o en canaleta, intentando evitar procesos de sedimentación.

Durante las 2 horas se registró la evolución de la tensión de fluencia, realizando mediciones cada 30 minutos.

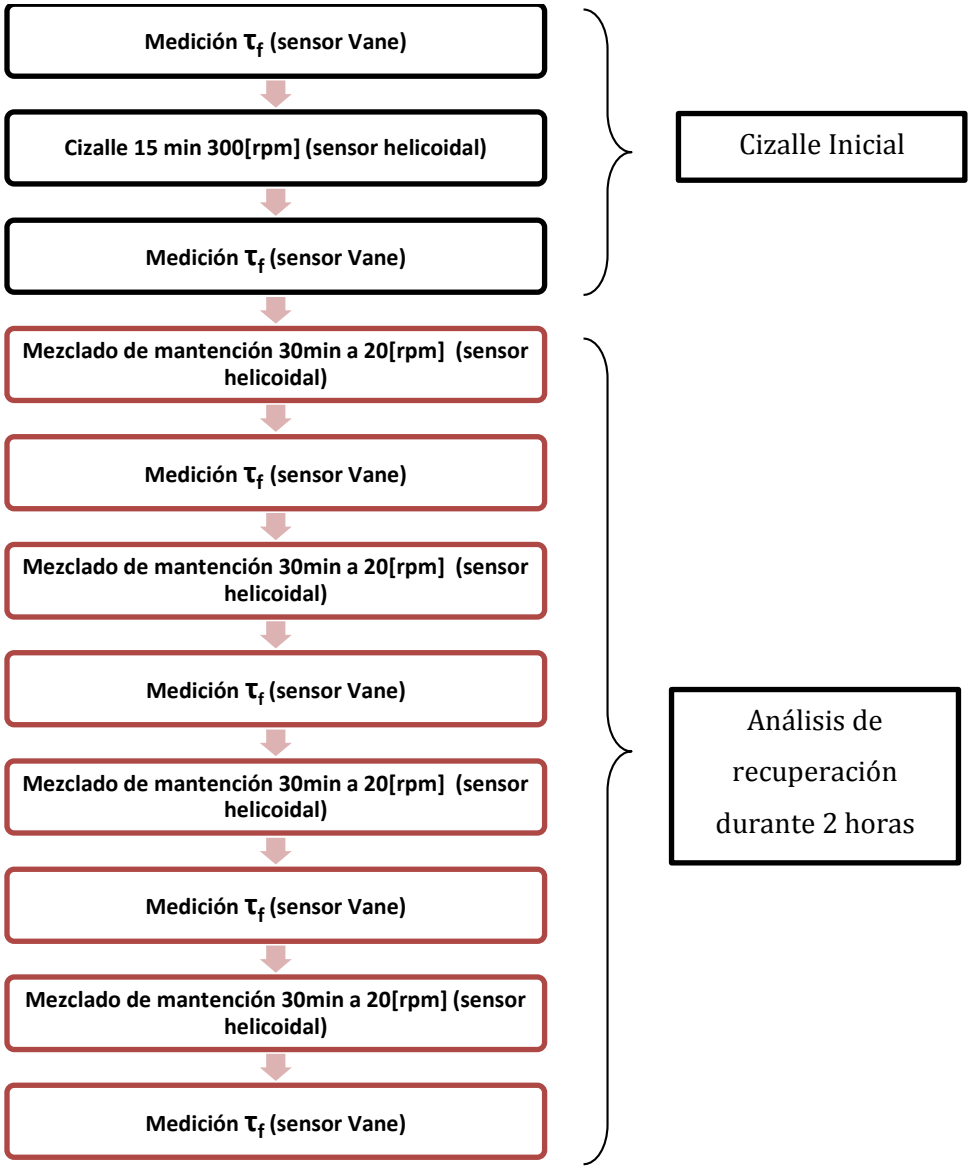


Figura 69 – Protocolo de cizalle y recuperación en relaves.

13.1. Granulometría

A través del sistema de medición de granulometría láser, se evaluó la muestra obteniéndose los resultados expuestos en la Tabla 15 y el gráfico de la Figura 70:

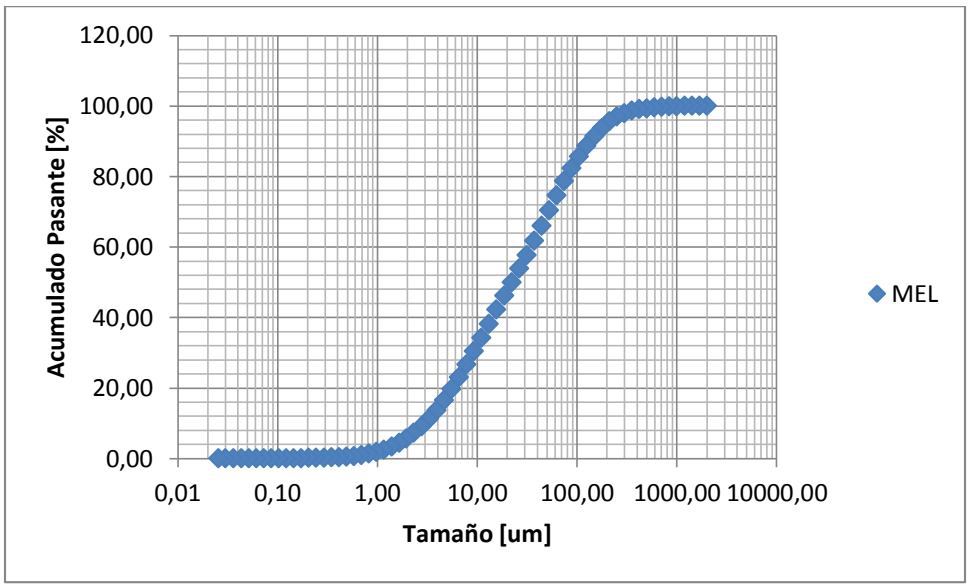


Figura 70 - Granulometría Laser de muestra MEL.

Tabla 15 – Granulometría Muestra MEL.

Muestra	D10 [µm]	D50 [µm]	D80 [µm]	D90 [µm]	D95 [µm]
Muestra MEL	3,0	22,0	78,7	135,6	196,6

13.2. pH

A todas las muestras de este experimento se les aplicó un ajuste de pH utilizando lechada de cal, hasta un pH=10 que es el valor utilizado en el proceso de Minera Escondida, lugar de origen de esta muestra.

13.3. Resultados

Los resultados de tensión de fluencia a distintos tiempos se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16 - Tensiones de Fluencia post cizalle.

Muestra	Tensión de Fluencia [Pa]										
	Inicial	Cizalle 15 [min] 300[rpm]	0 [min]	Mezcla 30 [min] 20rpm	30 [min]	Mezcla 30 [min] 20[rpm]	60 [min]	Mezcla 30 [min] 20[rpm]	90 [min]	Mezcla 30 [min] 20[rpm]	120 [min]
Cp 55% CF Original	5,70		4,01		3,83		3,77		3,81		3,88
Cp 55% CF Duplicado	4,69		3,93		3,89		4,00		3,99		4,10
Cp 55% SF Original	2,97		4,17		4,00		3,96		4,06		3,99
Cp 55% SF Duplicado	2,74		3,40		3,39		3,46		3,43		3,53
Cp 65% CF Original	60,20		44,40		40,30		38,90		38,30		39,30
Cp 65% CF Duplicado	64,30		45,20		41,00		38,70		40,10		39,90
Cp 65% SF Original	29,90		35,20		32,30		32,30		32,10		32,20
Cp 65% SF Duplicado	29,90		34,90		31,90		31,70		31,50		31,40

Los resultados fueron agrupados según concentración de sólidos en dos gráficos. Para Cp=55% se presentan en el gráfico de la Figura 71 y para Cp=65% se presentan en el gráfico de la Figura 72.

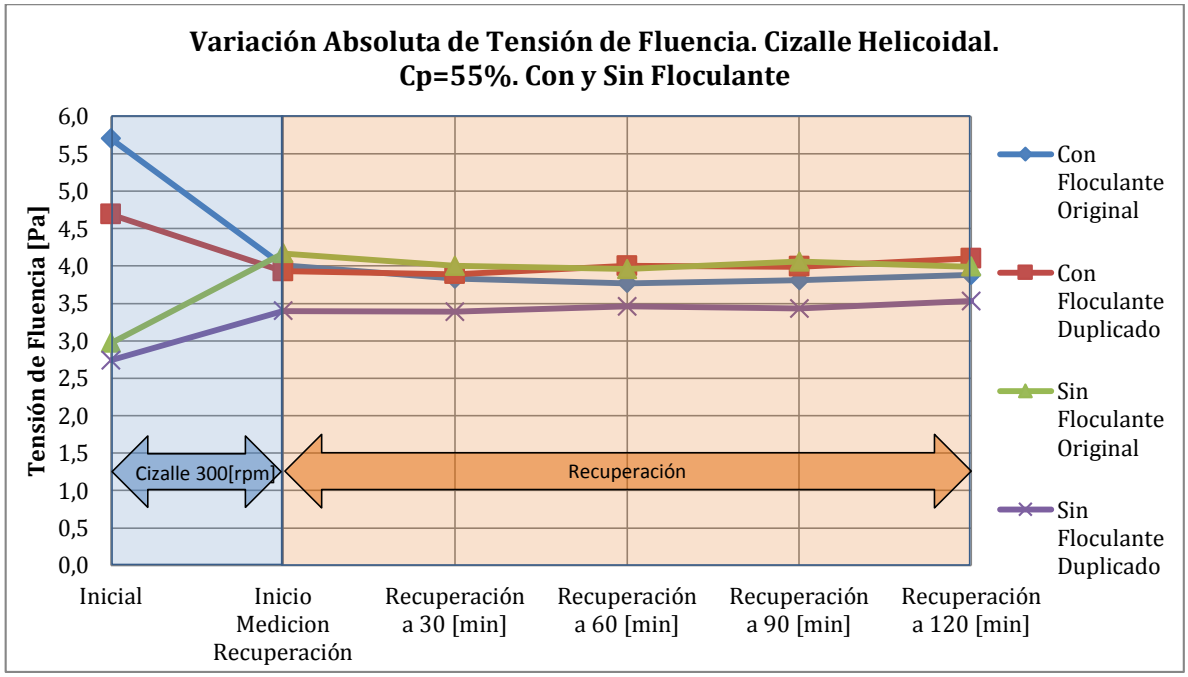


Figura 71 – Variación Tensión de Fluencia Cp=55%.

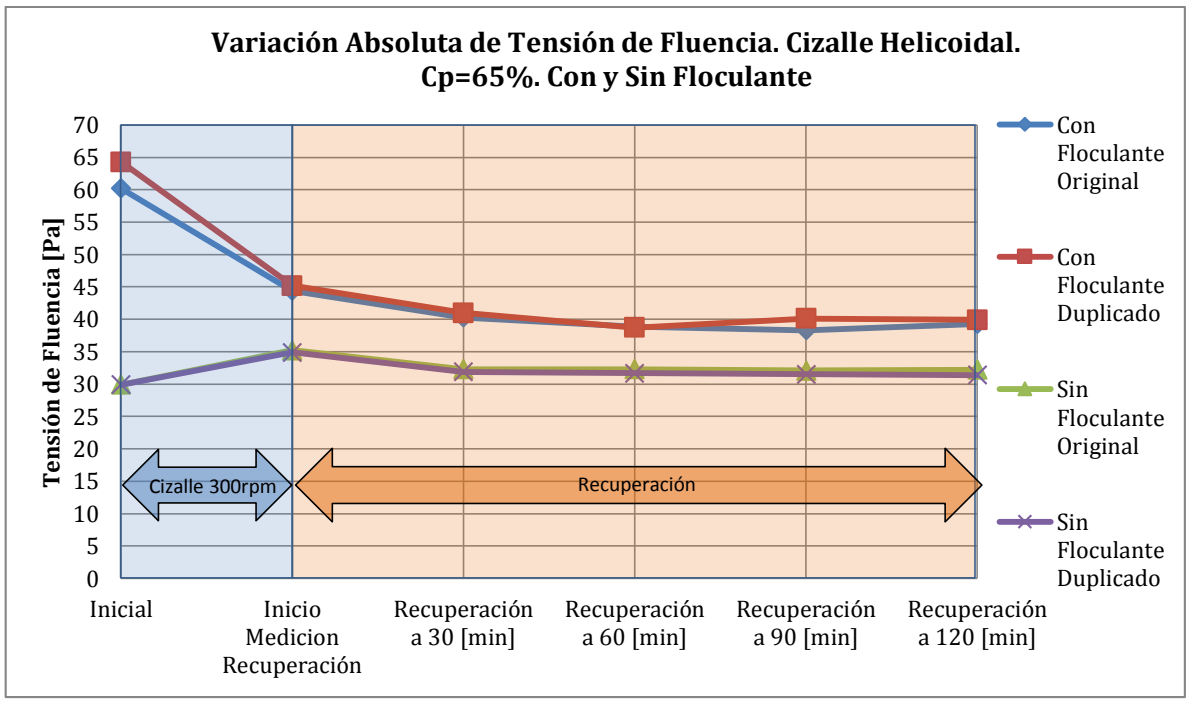


Figura 72 - Variación Tensión de Fluencia Cp=65%.

Se observa que **todas las muestras con floculante disminuyeron su tensión de fluencia después de ser vigorosamente cizalladas y en ningún caso hubo recuperación al estado inicial de tensión de fluencia dentro del lapso medido**. Esto descartaría la hipótesis que los relaves tienen un comportamiento tixotrópico.

En la Tabla 17 se presentan las variaciones porcentuales de las tensiones de fluencia de las muestras de relave. Se observa que la disminución de tensión de fluencia en términos absolutos, es mayor en altas concentraciones de sólidos. Sin embargo, el aumento de tensión de fluencia en términos absolutos rondan los 2 pascales para ambas concentraciones.

También se observa que las muestras con floculantes no pueden disminuir su tensión de fluencia más allá de su equivalente sin floculante: una vez destruidas las cadenas de polímeros, no hay otros elementos que romper. Si cizallamos un relave que no tiene incorporado floculante, no existiría una disminución de la tensión de fluencia porque no habría nada que romper.

En ambas concentraciones, se observa un gap entre las tensiones de fluencia residuales con y sin floculante, un umbral que existe al menos con este método de cizalle (15 minutos a 300[rpm] con un sensor Helicoidal).

Tabla 17 - Variaciones porcentuales de Tensión de Fluencia original y final a las 2 horas.

Cp [%]	CF/SF Original/Duplicado	Variación [%]	Promedio Variación [%]	Variación [Pa]	Promedio Variación [Pa]
55	CF Original	31,9%	22,3%	-1,8	-1,2
	CF Duplicado	12,6%		-0,6	
	SF Original	-34,3%	-31,6%	1,0	0,9
	SF Duplicado	-28,8%		0,8	
65	CF Original	34,7%	36,3%	-20,9	-22,7
	CF Duplicado	37,9%		-24,4	
	SF Original	-7,7%	-6,4%	2,3	1,9
	SF Duplicado	-5,0%		1,5	

14. Conclusiones

En la industria minera se ha observado que después de pasar por situaciones de cizalle los relaves disminuyen su valor de tensión de fluencia. Anteriormente no se tenían antecedentes de la recuperación de los parámetros reológicos aguas debajo de los elementos

cizalladores, es decir, el comportamiento a posterior en zonas menos energéticas. Tomando este antecedente fue que surgió la necesidad de esta investigación.

Como herramienta de medición de tensión de fluencia en fluidos concentrados se utilizó el reómetro, instrumento que viene utilizándose hace más de 70 años. Este equipo tiene métodos específicos de medición de tensión de fluencia, como por ejemplo el Vane, validado hace más de 30 años (Nguyen 1983). Es necesario recalcar que este método es el más usado en distintas industrias (alimentos, minería, hormigones, etc.) por su confiabilidad en los resultados de tensión de fluencia que entrega.

Utilizando el reómetro, el protocolo más utilizado para medir tixotropía es el 3-ITT (3 Interval Thixotropy Test, Mezger 2014). Consiste en aplicar a la muestra 3 intervalos de corte constante (bajo-alto-bajo) y observar como sus propiedades reológicas se van modificando en cada uno de ellos. Este método fue extendido para que dentro de un mismo protocolo pudiera medir τ_f inicial, cizallar y medir nuevamente τ_f.

Debido a la cantidad de variables que influyen en la reología y tixotropía de los relaves, fue necesario acotarlas a un número manejable y controlable: concentración de sólidos, pH, granulometría, tiempo de cizalle, velocidad de cizalle y uso de floculante.

El objetivo fue establecer correlación entre concentración de sólidos y velocidad de cizalle a las variaciones de tensión de fluencia sin considerar adición de floculante. De esta manera, los resultados obtenidos arrojaron lo siguiente:

- Al aumentar la velocidad de cizalle, también lo hace la variación porcentual. En algunos casos desde una posible “tixotropía” a una “reopexia”.
- Al aumentar la concentración de sólidos las curvas se desplazan hacia abajo, dominando un posible comportamiento tixotrópico
- A concentraciones similares, la cantidad de finos podría significar un desplazamiento de curva descendente, hacia zonas de tixotropía.

Considerando la experiencia en industria y de investigaciones como la de Pornillos (2011) resulta inesperado un aumento de la tensión de fluencia al aplicar altas RPM a la muestra. Lo esperado sería un comportamiento inverso es decir, a mayores RPM menores valores de tensión de fluencia.

Estas observaciones plantearían un problema de artefactos con el método en sí mismo, por lo tanto se plantean dos posibles problemas: sedimentación y efectos centrífugos.

La sedimentación estaría presente al depositarse parte del material en suspensión en el fondo del recipiente, más abajo del sensor Vane, generando mediciones erróneas al considerar una muestra menos concentrada. Este efecto disminuiría en muestras diluidas y velocidades altas, donde el sensor sería capaz de resuspender el material sedimentado, disminuyendo los valores medidos de tensión de fluencia post cizalle.

Los efectos centrífugos ocurrirían con muestras más diluidas y con altas velocidades, donde al igual que en un hidrociclón, la parte gruesa se desplazaría hacia zonas más distales, dejando la parte más fina en las proximidades del sensor, aumentando los valores medidos de tensión de fluencia post cizalle.

Se recomienda a futuro, desarrollar análisis específicos que expliquen estos comportamientos observados, como por ejemplo tomar muestras de distintas zonas del recipiente (tanto vertical como radial) y someterlas a ensayos de densidad y granulometría.

Como la esencia misma del método Vane es la nula interacción con las paredes del recipiente (Sofra et al. 2007), siempre existirá una porción de la muestra sin cizalle que al momento de homogenizar para evaluar con algún otro método (cilindro y copa por ejemplo), la porción no cizallada ponderaría valores erróneos en la medición de los parámetros en estudio (tensión fluencia o viscosidad).

Con el objetivo de subsanar estas observaciones encontradas, se propone la utilización de 2 tipos de sensores que en conjunto logren un protocolo de medición adecuado. Un sensor dedicado exclusivamente a medir tensión de fluencia y otro sensor dedicado exclusivamente en la aplicación de un cizalle convectivo. Así, además de cizallar la muestra en forma controlada y repetible, amplía la posibilidad de analizarla con alguna otra clase de método, como el Cilindro y Copa.

Este método alterna el uso de un sensor Vane (de confiabilidad comprobada en medición de tensión de fluencia) con el uso de un sensor Helicoidal para generar un cizalle controlado a cualquiera sea la concentración de la muestra.

Se tomó una muestra de relave proveniente de Minera Escondida sin contenido de floculante. Esta fue secada y repulpeada a 2 concentraciones de sólidos deseadas: 55% y 65% y para cada concentración se prepararon muestras con y sin floculante. El protocolo de ensayo propuesto, además de medir como varía la tensión de fluencia inmediatamente después del cizalle, analiza que ocurre con ésta variable en un lapso de 2 horas, con mediciones cada 30 minutos.

Los resultados mostraron que:

- La disminución de tensión de fluencia es característica propia de muestras con floculante.
- En el lapso de estudio, no hubo recuperación de tensión de fluencia en ninguna de las muestras.
- Con el cizalle aplicado, la tensión de fluencia de una muestra con floculante nunca disminuirá más allá de su equivalente sin floculante, incluso se observa un gap de diferencia mínimo entre ambas.
- En valor absoluto, muestras con floculante y más concentradas presentan una mayor disminución de tensión de fluencia.
- En valor absoluto, muestras sin floculante presentan un aumento similar de tensión de fluencia.

Se puede concluir que los relaves no son tixotrópicos, sino que tienen un comportamiento asociado a la destrucción de flóculos. Y por lo tanto, sin capacidad de recuperación, condición excluyente para considerarlos tixotrópicos.

Queda abierto a futuras investigaciones el estudio de muestras de relaves:

- En un mayor rango de concentraciones.
- Utilizando distintas mineralogías.
- Modificando geometría y velocidad de sensor Helicoidal.
- Utilizando distintos tipos y concentraciones de floculantes.

15. Bibliografía

Ancey, C. (2005). Introduction to Fluid Rheology. 118.

Andrews, W. (1981). *EEUU Patente nº US449102.*

Barnes, H. (1997). Thixotropy - a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*.

Barnes, H. (1998). The yield stress—a review or 'panta roi'—everything flows? *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*.

Barnes, H. (2000). *A Handbook of Elementary Rheology.*

Barnes, H. A., & Nguyen, Q. D. (2000). Rotating vane rheometry — a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*.

Bird, B., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2002). *Transport Phenomena* (Second Edition ed.). John Wiley.

Boger, D. (2004). Rheological Concepts. *Paste and Thickened Tailings - A Guide, 2nd Edition*. (R. Jewell, & A. Fourie, Edits.) Australia.

Chow, V. T. (1994). *Open Channel Hydraulics.* McGraw-Hill.

Coussot, P. (1994). Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. *Journal of Hydraulic Research*, 535-559.

Coussot, P., Ya. Malkin, A., & Ovarlez, G. (Marzo de 2017). Introduction: yield stress—or 100 years of rheology. *Rheologica Acta*, 2.

Domingez, F. J. (1974). *Hidraulica.* Santiago, Chile: Universitaria.

Environmental Protection Agency. (1994). *Desing and Evaluation of Tailing Dams.* Washington DC.

Evett, J., & Liu, C. (1988). *2500 Solved Problems in Fluid Mechanics and Hydraulics.* McGraw-Hill.

Faddick, R. (1986). Slurry Flume Design. *10th International Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport.* Insbruck, Austria.

Fasano, J. (2015). *Select the right impeller.* American Institute of Chemical Engineers.

Fitzpatrick, C., & Fradin, E. (2004). Temperature effects on flocculation, using different coagulants. *Water Science and Technology, Vol 50*(Nº 12), 171-175.

Fourie. (2002). Material Characteristics. *High Density & Paste Seminar.* Santiago, Chile.

Fuentes Aguilar, R. (2004). Slurry flumes in Chile. *16th International Conference of Hydrotransport.* Santiago, Chile.

Fuentes Aguilar, R. (2007). *Curso de Canaletas.* Santiago: JRI Ingenieria.

Fuentes Aguilar, R. (2007). *Fenómenos de Transporte en Miería y Metalurgia.* Santiago, Chile.

Fuentes Aguilar, R. (2011). *Curso de Reología de Pulpas.* Santiago: JRI Ingeniería.

Garcia, M., & Maza, J. (1998). Origen y Propiedades de los sedimentos. En *Manual de Ingeniería de Ríos.* D.F. México: Universidad Autonoma de México.

Govier, & Aziz. (1973). *The Flow of Complex Mixtures in Pipes.* Van Nostrand Reinhold.

Hales C., T. (2005). A proof of the Kepler conjecture. 1065-1185. Pittsburgh, United States.

Hamilton, M. (1932). California Gold-Rush English. *American Speech, 7*(6), 423-433.

Heymann, L., Peukert, S., & Aksel, N. (2002). On the solid-liquid transition of concentrated suspensions in transient shear flow. *Rheologica Acta*, 307-315.

Heywood, N. (s.f.). Rheological Characterisation of Non-Settling Slurries. En *Slurry handling design of solid-liquid systems.* Elsevier Applied Science.

International Organization for Standardization. (1993). ISO 3219. *Plastics - Polymers/resins in the liquid state or as emulsions or dispersions - Determination of viscosity using a rotational viscometer with defined shear rate*, 8.

JRI Ingeniería. (Junio de 2013). Pauta para elaboración de criterios de diseño para sistemas de transporte de fluidos a larga distancia. Santiago, Chile.

JRI Ingeniería. (2014). Ensayo de Reología con Reómetro HAAKE RHEOSTRESS 6000. Santiago, Chile.

JRI Ingeniería. (2014). Instructivo de uso y operación reómetro HAAKE RHEOSTRESS 6000. Santiago, Chile.

JRI Ingeniería. (2014). Instructivo uso software reómetro HAAKE RHEOSTRESS 6000. Santiago, Chile.

JRI Ingeniería. (2014). *Trade Off Selección Sistema De Transporte De Concentrado.* Santiago.

Krieger, I., & Elrod, H. (1953). Direct Determination of the Flow Curves of NonNewtonian Fluids. II. Shearing Rate in the Concentric Cylinder Viscometer. *Journal of Applied Physics*.

Kruyt, N. (1992). Experimental and theoretical study of rapid flows of cohesionless granular materials down inclined chutes. Laboratory for Bulk Solids Handling, Department of Mechanical Engineering, University of Twente.

Larenas, M. (Mayo de 2010). Modelos en reologia y aplicaciones a fluidos. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Mezger, T. (2014). *The Rheology Handbook* (4th ed.). (V. Network, Ed.) Hanover, Germany.

Nguyen Quoc Dzuy, & Boeger, D. (1983). Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. *Journal of Rheology*.

OECD (2012). (2012). *OECD Environmental Outlook to 2050.* OECD Publishing.

Pierre, A., & Perrot, A. (2017). A study on the limitations of a vane rheometer for mineral suspensions using image processing. *Rheological Acta, 56*, 17.

Pornillos, E. (2011). A technique for measuring the reduction of yield stress of thickened tailings. *14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings.* Perth, Australia.

Rayo, J. (21 de Noviembre de 2012). Valorización del Capex y Opex en proyectos Mineros. Santiago.

Rayo, S. (2015). Efecto de las arcillas en UGs en el manejo de relaves y Make-up de plantas concentradoras. Santiago, Chile.

Rayo, S. (2016). Fluidodinamica en Minería. Santiago, Chile.

Sofra, Fisher, & Boeger. (2007). The Bucket Rheometer for Thickened Tailings and Paste Flow Curve Determination. *Paste 2007*.

Thomas. (2010). Method of determining the inherent viscosity of a slurry and other rheological trends as illustrated by a data bank of over 200 different slurries . *18th International Conference on Hydrotransport 2010 .* Rio de Janeiro.

Torres, M. (2008). Transporte de Pulpas. Santiago, Chile.

Truesdell, C. (1966). *The Mechanical foundations of elasticity and fluid dynamics.* New York, U.S.: Gordon and Breach.

Truesdell, C., & Noll, W. (2004). *The Non-Linear Field Theories of Mechanics .* Springer.

Vanoni, V. (2006). *Sedimentation Engineering.*

Vidal, C. (Junio de 2013). Estudios Reofísicos de Relaves Chilenos. 137. Santiago, Chile: UChile.