

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**RELACIÓN ENTRE ASENTAMIENTO Y ESFUERZO DE
CEDENCIA EN RELAVES MINEROS**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JUAN WALTER CABRERA CABRERA

LIMA - PERÚ

2010

RESUMEN

En la presente investigación se analiza la validez de la prueba de asentamiento para predecir el esfuerzo de cedencia en pastas y pulpas de relaves de minas polimetálicas en el Perú.

Debido al escaso conocimiento y divulgación del tema se presenta un breve resumen de los fundamentos de la Reología, con el fin de dar sustento a la investigación.

A partir del análisis físico de la prueba de asentamiento para una geometría cilíndrica, de acuerdo a los parámetros trazados por Pashias y Boger (1996) y Coussot (2002); se hace un recuento de varias expresiones frecuentemente utilizadas para relacionar el asentamiento (s) y el esfuerzo de cedencia (τ_c), analizando su validez con la aplicación de una serie de ensayos efectuadas en el Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Las muestras utilizadas en la investigación, procedentes de minas polimetálicas en el Perú, poseen características físicas muy diferenciadas, motivo por el cual se ha realizado una caracterización física en forma paralela a la caracterización reológica.

Los resultados arrojaron una mejor aproximación de la ecuación propuesta por Coussot [1] respecto a amplios rangos de concentración másica de sólidos, mientras que la ecuación de Boger tiene mejor aproximación para concentraciones másicas elevadas (>74%). Asimismo, se encuentra que existe una relación cuadrática entre el esfuerzo de cedencia y la altura de la masa asentada.

INDICE

RESUMEN	4
LISTA DE CUADROS	5
LISTA DE FIGURAS	6
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I : FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
1 1 REOLOGÍA	12
1 2 CONCEPTOS REOLÓGICOS IMPORTANTES	13
1 3 CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS	17
CAPÍTULO II : PARÁMETROS FÍSICOS Y REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO	26
2 1 REOMETRÍA	26
2 2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS	26
2 2 1 De acuerdo al sistema de medición	27
2 2 2 De acuerdo a su geometría	27
2 2 3 De acuerdo a su funcionamiento	30
2 2 4 La Prueba de Asentamiento	32
2 3 SISTEMA SÓLIDO LÍQUIDO	36
2 4 PROPIEDADES REOLOGICAS Y PARÁMETROS REOLÓGICOS	36
2 5 RELAVES MINEROS	37
2 5 1 Características Físicas	37
2 5 2 Características Químicas	43
CAPÍTULO III : ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO	49

3 1 ANÁLISIS TEÓRICO	49
3 2 SELECCIÓN DEL EQUIPO	50
3 3 DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN	53
3 4 CALIBRACIÓN	63
3 4 1 Ecuaciones existentes	65
3 4 2 Relación Empírica	71
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	79

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el Perú operan alrededor de 200 minas metálicas, con un número desconocido de depósitos de relaves activos e inactivos. De estas minas, 54 producen más de 100 ton/día y sólo 26 más de 500 ton/día. Siete de éstas son operaciones a tajo abierto con minas subterráneas completando la diferencia [12].

En la mayoría de ellas predomina la descarga descontrolada de relaves (hasta 4,000 ton/día) directamente a ríos y lagos. Muchas de ellas han construido presas de relave con el fin de mantener las fuentes de agua limpias, pero sólo han tenido un éxito relativo.

Debido a la disponibilidad muy limitada de equipo de movimiento de tierra de gran capacidad en la mayoría de las minas subterráneas pequeñas, los métodos de construcción de presas para relaves están limitados, principalmente, a la descarga directa por grifos, cicloneo y labor manual, métodos que no garantizan la estabilidad de la obra.

Desde un punto de vista ingenieril, la mayor deficiencia del diseño de estas presas es que no toman en cuenta eventos extremos (inundaciones y terremotos), ni durante el proceso de diseño ni durante el establecimiento del depósito. Así, en nuestro país predominan las presas de relaves sísmicamente vulnerables "aguas arriba", con sistemas de derivación de aguas superficiales apenas superiores a un flujo normal y depósitos de relaves ubicados en cañones empinados, cuya existencia es limitada a unos pocos años por los huaycos.

Las prácticas actuales de las presas de relaves tienden a considerar casos extremos que tienen intervalos de ocurrencia de quizás algunas pocas decenas de años; sin embargo, la práctica internacional sobre seguridad en presas de relaves que requieren un diseño para casos extremos considera intervalos de ocurrencia de muchos cientos o miles de años. Esta deficiencia ha provocado la

ocurrencia de fallas sísmicas e hidrológicas y la ruptura de diversas presas de relaves en el Perú.

Actualmente varias minas en el Perú utilizan nuevas técnicas de disposición de relaves, tales como el relleno subterráneo, método de descarga espesada y disposición de relaves deshidratados, demostrando la posibilidad de aplicación de nuevas alternativas a los depósitos de relaves convencionales en el Perú; sin embargo, estas nuevas tecnologías hacen necesario un estudio más profundo del relave como mezcla y las características de su flujo, siendo imprescindible el apoyo de la Reología.

Con este fin, diferentes laboratorios de investigación han diseñado diversos equipos, llamados reómetros, que son utilizados para medir el esfuerzo de cedencia, parámetro imprescindible en el estudio de flujos bifásicos, en muestras cuidadosamente preparadas. Sin embargo, estos instrumentos son o demasiado costosos o no son lo suficientemente fuertes para su uso en campo.

La "Prueba de Asentamiento" es un método simple utilizado para medir el esfuerzo de cedencia de ciertos materiales como el concreto. En este procedimiento una muestra de prueba cilíndrica es limitada a deformarse bajo su propio peso, y el esfuerzo de cedencia se obtiene del cambio en la altura (asentamiento) de la muestra utilizando una curva de calibración empírica.

Respecto a este ensayo, se han planteado muchas ecuaciones, tanto empíricas como teóricas que relacionan dichas variables, sin embargo no todas son aplicables a las distintas mezclas o soluciones existentes, debido a las características propias de cada una.

La presente investigación busca validar una de estas expresiones y a la vez, establecer una curva empírica de la relación asentamiento / esfuerzo de cedencia para un flujo hiperconcentrado de relaves; las cuales permitan estimar valores del esfuerzos de cedencia de un determinado flujo en forma indirecta a partir de este ensayo.

En el Perú, se han realizado pocas investigaciones orientadas al campo de la reología o similares. En la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, se ha encontrado las siguientes:

- Transporte sólido en tuberías – Aplicación al transporte de fosfato en el complejo Bayovar. **Germán Vera Lazo De La Vega**. Universidad Nacional de Ingeniería, 1979 – Tesis.
- Transporte de pulpas por tuberías y canal. **Carlos Alejandro Córdova Rojas**. Universidad Nacional de Ingeniería, 1988 – Tesis.

Debido a que la presente investigación se encuentra dentro del campo de la investigación experimental: observa, plantea hipótesis y trata de verificarlas mediante experimentación, su contenido se ha estructurado de la siguiente manera:

- CAPITULO I : Contiene una revisión de conceptos y fundamentos reológicos básicos, incluyendo una clasificación de fluidos y comportamientos de flujo.
- CAPITULO II : Se centra en el estudio de sistemas sólido-líquido y flujos hiperconcentrados, incluyendo una clasificación de reómetros para la medición de parámetros reológicos, y diferentes métodos directos e indirectos para la determinación de los mismos, y la prueba de asentamiento. Además se incluye una revisión de conceptos relativos a relaves mineros.
- CAPITULO III: Contiene el análisis teórico del ensayo de asentamiento, la descripción del ensayo, y todo el análisis de resultados de los ensayos realizados, incluyendo gráficos y correlaciones.

La data de trabajo se presenta como anexo en la parte final de la investigación.

CAPÍTULO I : FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. REOLOGÍA

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de un cuerpo sometido a esfuerzos externos; es decir, estudia la respuesta de un material ante una fuerza actuante, proveyendo las herramientas para entender estos comportamientos [6].

En la figura siguiente, se muestra un fluido entre dos placas paralelas. Si la placa inferior se mantiene estacionaria, mientras que la placa superior se mueve a una velocidad v como consecuencia de una fuerza F aplicada a ella, se producirá una deformación simple:

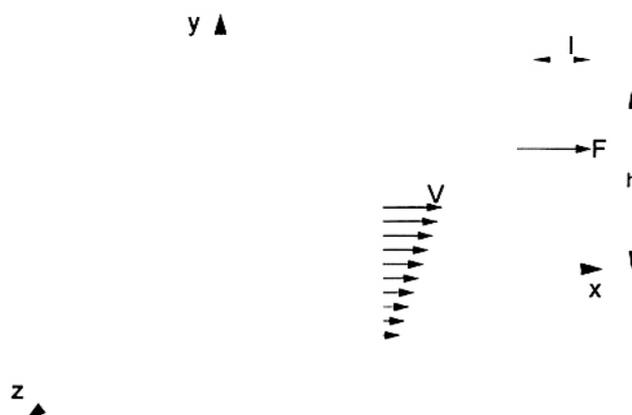


Figura 1.1: Movimiento de un fluido bajo la acción de una fuerza F.

Fuente: Referencia bibliográfica [6]

El movimiento de la placa establece un gradiente de velocidad en el fluido, determinando a la vez la presencia de otras variables importantes como la deformación, la viscosidad y el corte.

1.2. CONCEPTOS REOLÓGICOS IMPORTANTES

a) Corte

Si representamos al fluido como un conjunto de láminas paralelas y en contacto unas con otras (similar a una pila de hojas de papel), llamaremos corte al movimiento de una capa relativo al de capas adyacentes paralelas.

b) Deformación (θ)

Es el ángulo de cambio de la forma de un fluido o sólido.

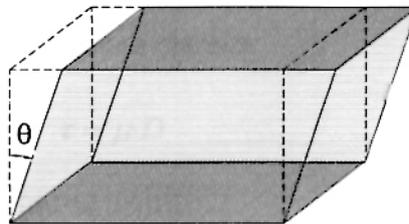


Figura 1.2: Deformación de un cuerpo bajo la acción de una fuerza F.

Fuente: Referencia bibliográfica [11]

c) Esfuerzo de Corte (τ)

Se define como la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una deformación dada.

$$\tau = \frac{F(\text{fuerza})}{A(\text{área})} \quad (1.1)$$

Las unidades más utilizadas son los pascales [Pa], y dinas/cm².

d) Esfuerzo de Cedencia (τ_y)

Es el esfuerzo de corte mínimo necesario para que un material fluya.

e) Gradiente de Velocidad (D)

Es el cambio de la deformación por unidad de tiempo, es decir, es la velocidad de variación de la deformación. Sus unidades son s⁻¹.

También se le conoce como “velocidad de deformación” ($\dot{\theta}$); de donde:

$$D = \frac{du}{dy} \equiv \frac{d\theta}{dt} \equiv \dot{\theta} \quad (1.2)$$

Siempre considerando al fluido como una pila de láminas paralelas, podemos afirmar que la velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad (u) de la lámina superior aumente y la distancia entre la lámina superior e inferior se hace más pequeña. Así, el fluido entre las láminas resiste el movimiento de la lámina superior y esta resistencia al flujo es la viscosidad dinámica μ .

f) Viscosidad (μ)

Es una propiedad de la materia cuya medida representa su oposición a fluir frente a un esfuerzo de corte actuante, es decir, mide la resistencia a la deformación.

La Ley de Newton, relaciona viscosidad, esfuerzo cortante y velocidad de deformación (gradiente de velocidad) de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \cdot D \quad (1.3)$$

donde : τ : esfuerzo cortante [mPa].

μ : viscosidad [mPa·s]

D: velocidad de deformación [s⁻¹]

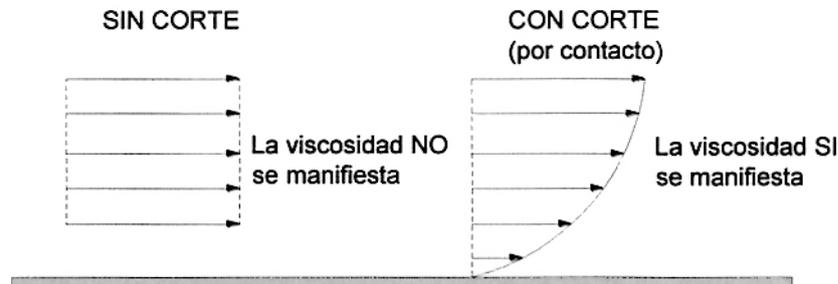


Figura 1.3: Manifestación de la viscosidad debido al corte.

Fuente: Referencia bibliográfica [11]

Las unidades de viscosidad más utilizadas son los mili pascales por segundo [mPa·s], y el centi Poise [cp]. Las equivalencias correspondientes son:

$$1 \text{ pascal (1Pa)} = 1\text{Kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-2}$$

$$1 \text{ pascal – segundo (1Pa}\cdot\text{s)} = 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ centipoise (1cp)} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ Poise} = 1 \text{ g/cm}\cdot\text{s}$$

Existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

- La viscosidad dinámica o absoluta, denominada " μ ", se define como la pendiente en cada punto de la curva de fluidez (ver figura 1.4).
- La viscosidad aparente " $\bar{\mu}$ " se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de "viscosidad" para fluidos no newtonianos (ver figura 1.4).

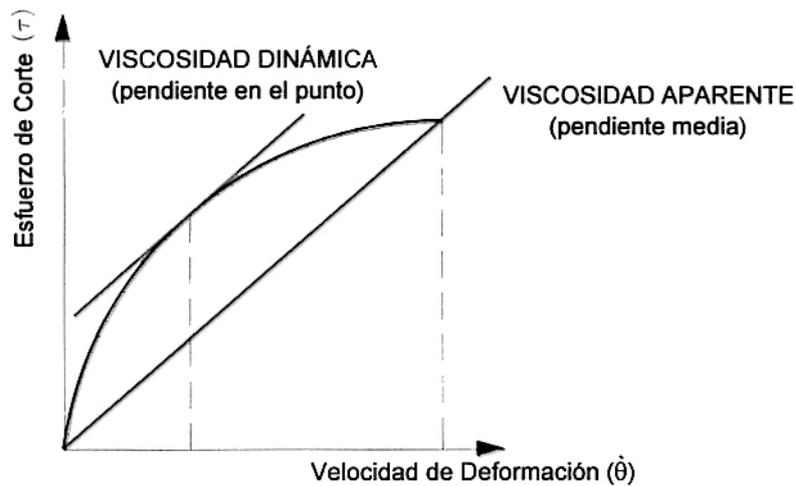


Figura 1.4: Curva de fluidez representando la viscosidad dinámica y aparente.

Fuente: Elaboración propia.

- Finalmente, la viscosidad cinemática " ν ", representa la característica propia del líquido sin considerar las fuerzas que generan su movimiento, obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del fluido utilizado.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4)$$

donde: ν : viscosidad cinemática.

μ : viscosidad dinámica .

ρ : densidad del fluido.

Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centi stokes [cst]:

$$1 \text{ stoke} = 100 \text{ centi stokes} = \text{cm}^2/\text{s}$$

g) Curva de flujo

La correlación entre el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\theta}$) definen el comportamiento del flujo de un líquido. Este comportamiento puede mostrarse gráficamente en un diagrama con τ en la ordenada y $\dot{\theta}$ en la abscisa. Este diagrama es llamado "Curva de Flujo".

El tipo más simple de una curva de flujo se muestra a continuación. La viscosidad en la Ley de Viscosidad de Newton se ha asumido constante e independiente de la velocidad de deformación.

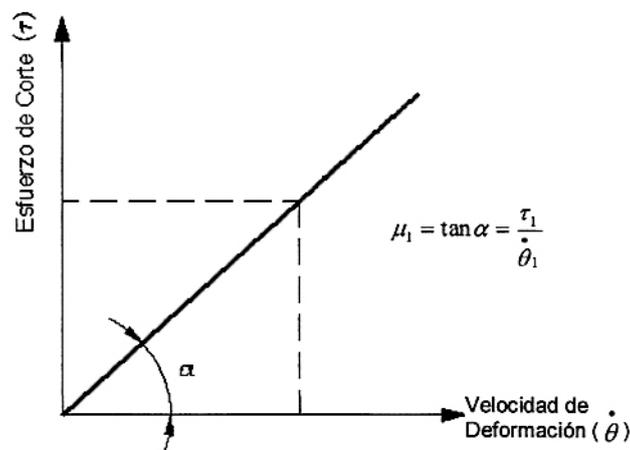


Fig. 1.5. Curva de Flujo de un "Líquido Newtoniano"

Fuente: Elaboración propia.

h) Curva de viscosidad

Otro diagrama muy común es: μ vs $\dot{\theta}$, llamado "Curva de Viscosidad".

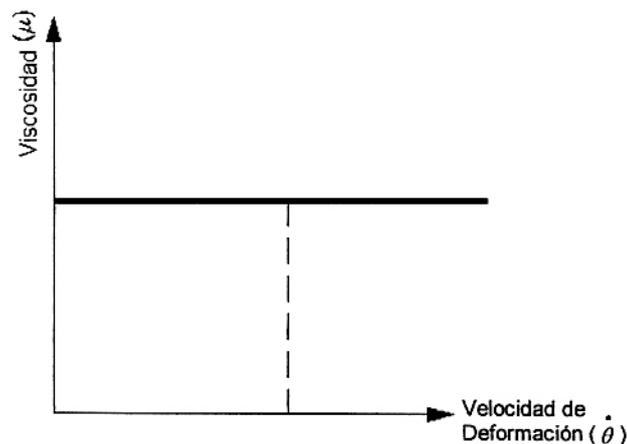


Fig. 1.6. Curva de Viscosidad de un "Líquido Newtoniano"

Fuente: Elaboración propia.

La curva de viscosidad mostrada en la figura 1.6 corresponde a la curva de flujo de la figura 1.5. Las mediciones de la viscosidad siempre resultan primero en la curva de flujo. Esto permite que los resultados puedan ser corregidos matemáticamente para permitir la construcción de la correspondiente curva de viscosidad. Los diferentes tipos de curvas de flujo tienen sus correspondientes tipos de curvas de viscosidad, como se verá más adelante.

i) Número de Deborah (De)

Es la razón entre el tiempo característico de una observación t_{obs} y el tiempo de relajación t_r [1].

$$De = \frac{t_{obs}}{t_r} \quad (1.5)$$

Cuando $De \ll 1$, el observador no tiene el tiempo suficiente para registrar algún movimiento de flujo o arrastre y el comportamiento del material puede considerarse como sólido. Cuando $De \gg 1$, el material tiene tiempo para relajarse y modificar su estructura como respuesta a las fuerzas aplicadas; el material se comporta como un fluido. Estas manifestaciones son observables dentro del tiempo de observación.

j) Tiempo de Relajación

La reología considera que “todo fluye”, incluso los sólidos (pero muy lentamente). De esta manera se define el “tiempo de relajación” como “el tiempo característico necesario para que un material fluya”.

1.3. CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS

De acuerdo a su comportamiento viscoso, los fluidos pueden clasificarse en dos grandes grupos [11]:

- Fluidos puramente viscosos
- Fluidos viscoelásticos

A continuación se presenta un esquema con los tipos de fluidos existentes en Reología:

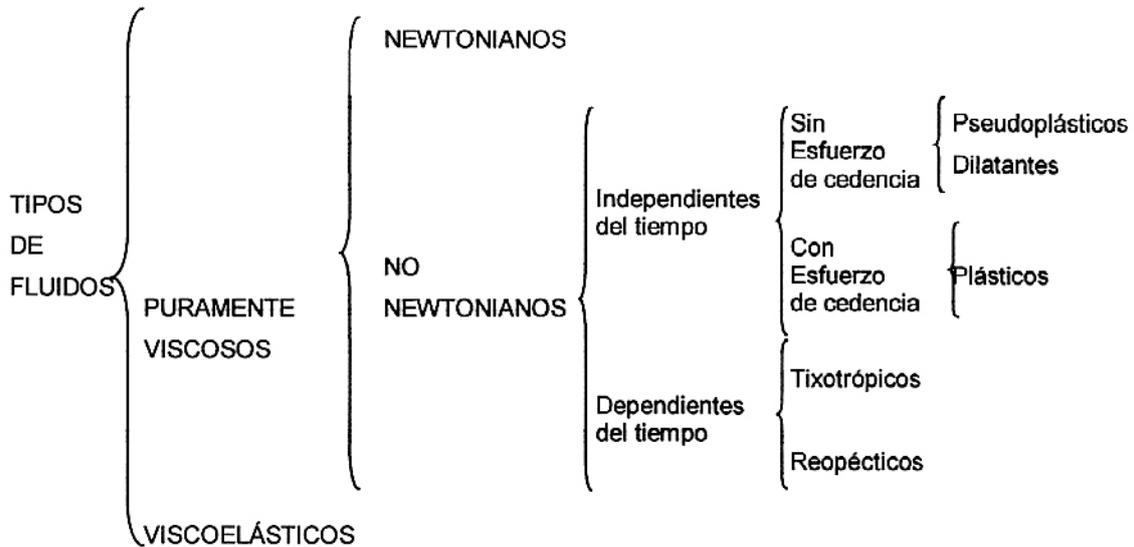


Fig. 1.7. Clasificación de fluidos reológicos.

Fuente: Elaboración propia.

1.3.1. FLUIDOS PURAMENTE VISCOSOS

Los fluidos que no presentan comportamiento elástico como los sólidos, no sufren una deformación reversa cuando el esfuerzo de corte cesa, y son llamados fluidos puramente viscosos. El esfuerzo de corte depende sólo de la rapidez de deformación y no de su longitud. Éstos se subdividen en fluidos Newtonianos y No Newtonianos.

a) FLUIDOS NEWTONIANOS

Presentan una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación [14].

La viscosidad dinámica μ de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

Las curvas características de fluidez y de viscosidad son:

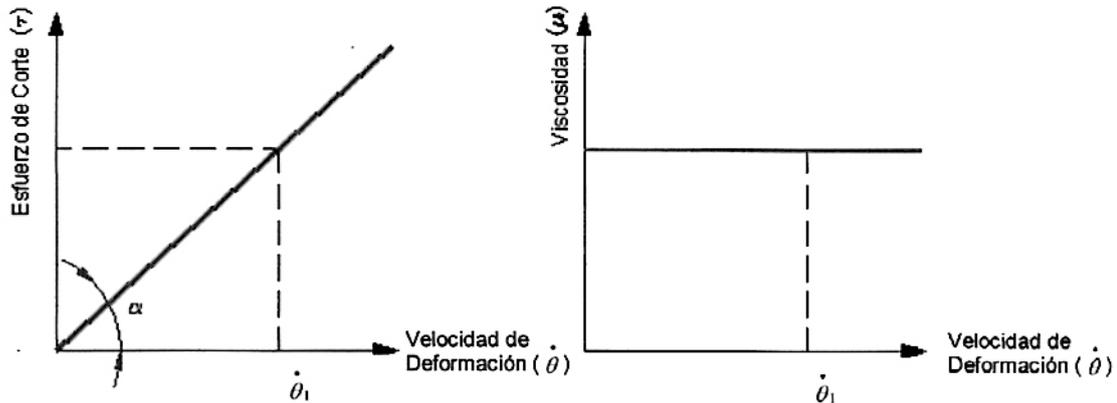


Figura 1.8 Curvas de fluidez y de viscosidad. Fluido newtoniano.

Fuente: Referencia Bibliográfica [13].

b) FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Son aquellos en los cuales la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación no es lineal. Éstos pueden ser independientes o dependientes del tiempo.

b.1) FLUIDOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO DE APLICACIÓN:

Estos fluidos se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no esfuerzo de cedencia.

b.1.1) Fluidos sin esfuerzo de cedencia

- Fluidos pseudoplásticos (SHEAR-THINNING)

Se caracterizan por la disminución de su viscosidad y el incremento de su esfuerzo cortante con la velocidad de deformación [13]. Su comportamiento se puede observar en las siguientes curvas:

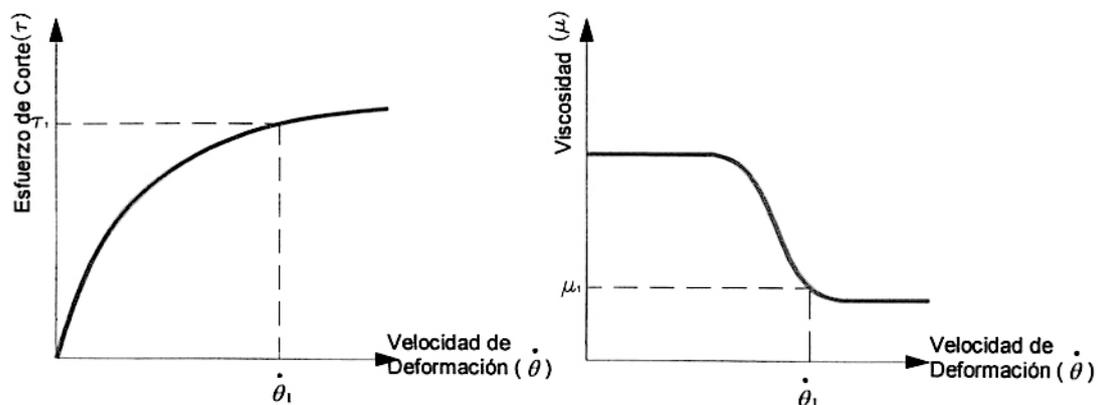


Figura 1.9: Curvas de fluidez y de viscosidad. Fluido pseudoplástico

Fuente: Referencia Bibliográfica [13].

Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de ketchup, mostaza, algunas clases de pinturas, suspensiones acuosas de arcilla, etc.

Para la formulación matemática de un fluido pseudoplástico en movimiento simple suele utilizarse la Ley de potencia (Ostwald):

$$\tau = K \cdot D^n = K |D^{n-1}| \cdot D \quad (1.6)$$

siendo: τ : el esfuerzo cortante [mPa].

D: la velocidad de deformación [s^{-1}]

K: índice de consistencia; sus dimensiones dependen del valor de n .

n: índice de comportamiento de flujo (entero menor que uno).

- Fluidos dilatantes (SHEAR-THICKENING)

Los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la velocidad de deformación, es decir, un aumento del esfuerzo cortante con dicha velocidad [13]. Algunos ejemplos de fluidos dilatantes son: la harina de maíz, las disoluciones de almidón muy concentradas, la arena mojada, dióxido de titanio, etc.

El fenómeno de dilatación se produce debido a la fase dispersa del fluido. En dicho fluido tiene lugar un empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio. Si se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos entre las partículas dispersas aumentan. Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia aparece y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo cortante (la viscosidad aumenta).

El comportamiento dilatante es descrito también por la ley de potencia, con valores de n menores a la unidad.

$$\tau = K \cdot D^n = K |D^{n-1}| \cdot D \quad (n < 1) \quad (1.7)$$

Las curvas de fluidez y viscosidad son las siguientes:

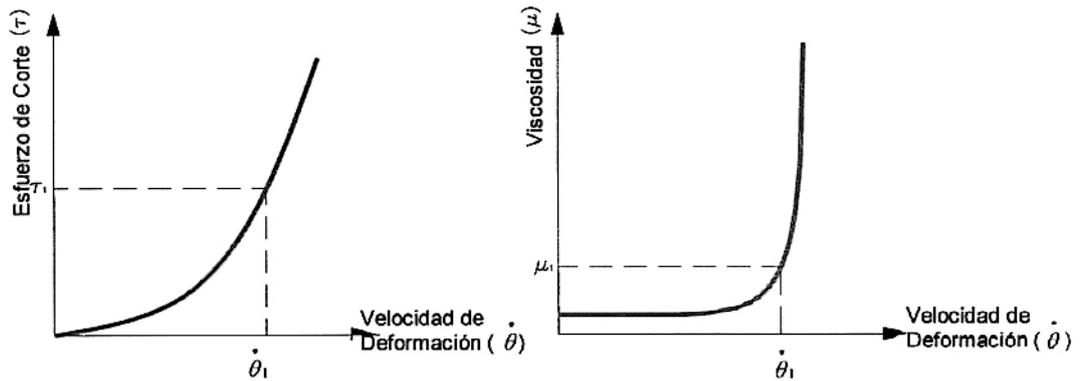


Figura 1.10: Curvas de fluidez y de viscosidad. Fluido dilatante.

Fuente: Referencia Bibliográfica [13].

b.1.2) Fluidos con esfuerzo de cedencia (plásticos o VISCOPLASTICOS)

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo de cedencia) y a partir de dicho valor se comporta como un líquido [13].

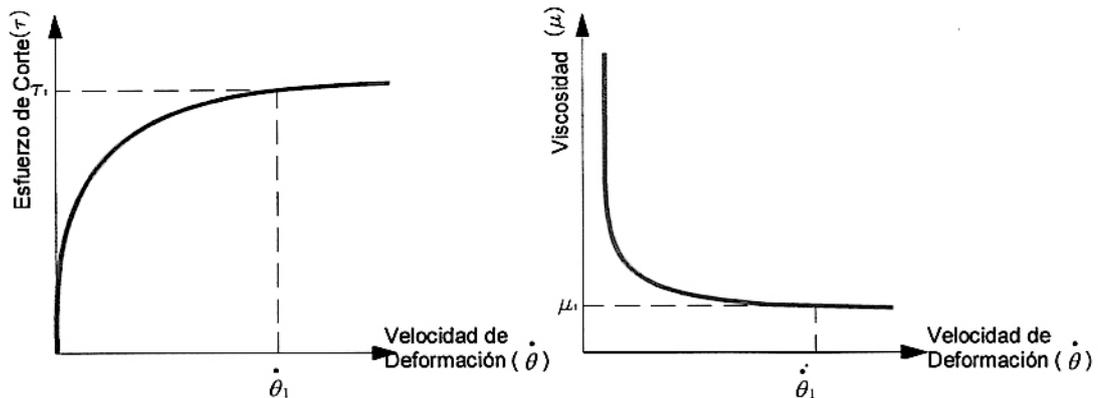


Figura 1.11. Curvas de fluidez y de viscosidad. Fluido plástico

Fuente: Referencia Bibliográfica [13].

Este comportamiento se debe a la gran interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior, formando una capa llamada de solvatación. Están formados por dos fases, con una fase dispersa formada por sólidos y burbujas distribuidos en una fase continua. Aquí, las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno, producen una atracción mutua entre partículas. También aparecen fuerzas de repulsión debidas a potenciales de la misma polaridad.

En este tipo de fluidos se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras tipo gel. Si las partículas son muy pequeñas poseen entonces una gran superficie específica, rodeados de una capa de adsorción formada por moléculas de fase continua. Gracias a esta capa, las partículas inmovilizan gran cantidad de fase continua hasta que no se aplica sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos, a su vez, se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, a partir de su esfuerzo de cedencia. Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham y si no la hay, se denominan solo plásticos.

Las ecuaciones que modelan el comportamiento de los fluidos plásticos son:

1) Ecuación generalizada de *Bingham* (para fluidos plásticos de Bingham):

$$\tau - \tau_y = \bar{\mu} |D|^{n-1} D \quad (1.8)$$

con τ : esfuerzo cortante (Pa)

τ_y : esfuerzo de cedencia (Pa).

$\bar{\mu}$: viscosidad aparente (Pa·s)

D : velocidad de deformación (s⁻¹)

n : índice de comportamiento de flujo (entero)

2) Ecuación de *Casson* (para fluidos plásticos):

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \mu_\infty \cdot \sqrt{D} \quad (1.9)$$

siendo τ : esfuerzo cortante (Pa)

τ_y : esfuerzo de cedencia (Pa)

D : velocidad de deformación (s⁻¹)

μ_∞ : viscosidad plástica definida por Casson

b.2) FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO DE APLICACIÓN:

Se clasifican en dos tipos: los fluidos tixotrópicos y los reopécticos.

Fluidos Tixotrópicos

Estos fluidos, una vez finalizada la aplicación del esfuerzo cortante, recuperan su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad disminuye a medida que se incrementa la fuerza cortante y vuelve a aumentar al ir disminuyendo dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. Aparece un fenómeno de Histéresis [1].

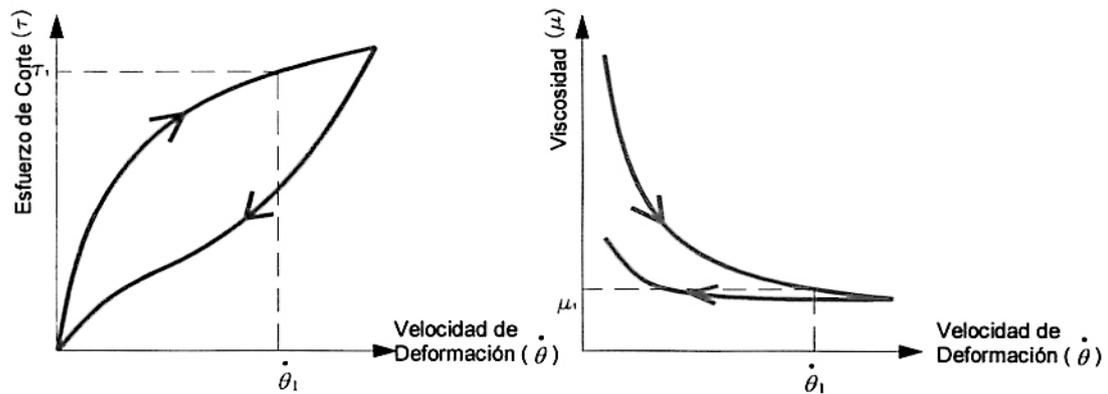


Figura 1.12: Curvas de fluidez y de viscosidad. Fluido tixotrópico

Fuente: Referencia Bibliográfica [1].

Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas, el yogur, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, el nylon, etc.

Para modelar la variación de la viscosidad con el tiempo, se ideó la siguiente ecuación:

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^t M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \quad (1.10)$$

donde,

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(II)}{II} \exp\left[-\frac{(t-t')}{II}\right] dII \quad (1.11)$$

siendo,

II : el tiempo de relajación del fluido, es decir, el tiempo que tarda el fluido en disminuir su tensión a $1/e$ veces.

$R(II)$: función de distribución de tiempos de relajación .

μ_0 : viscosidad inicial sin perturbaciones.

$f(D^2)$: función simétrica de la velocidad de deformación.

Fluidos Reopécticos

Los fluidos reopécticos, se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza cortante y con la velocidad de deformación aplicada y presentan una histéresis inversa a estos últimos. Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad [1].

Las curvas de fluidez y de viscosidad de los fluidos reopécticos se representan en la figura 1.12. Note los lazos histeréticos característicos de este material.

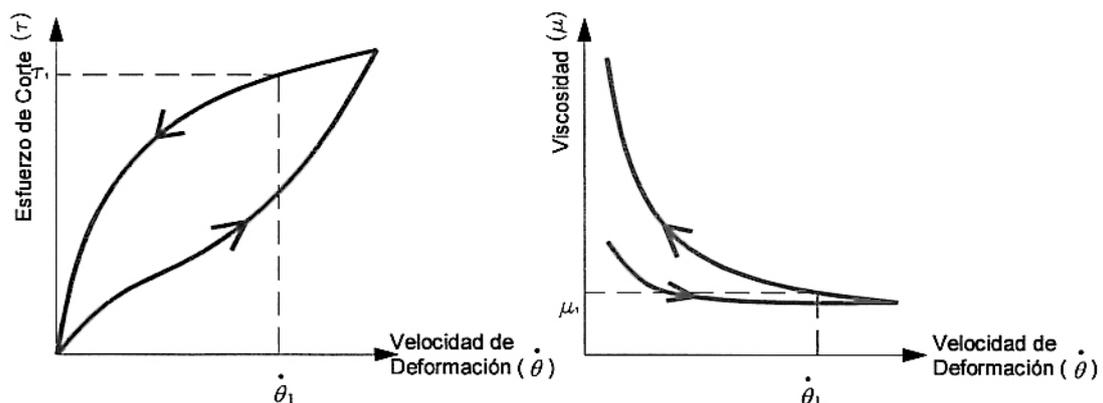


Figura 1.13: Curvas de fluidez y de viscosidad. Fluido reopéctico.

Fuente: Referencia Bibliográfica [1].

Existen pocos fluidos de este tipo. Algunos ejemplos son: el yeso (yeso mezclado con el agua da lugar a un fluido reopéctico, endureciéndose muy rápidamente) y la arcilla bentonítica, entre otros.

1.3.2. FLUIDOS VISCOELÁSTICOS

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia

en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos.

La ecuación que describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de *Maxwell*:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \bar{\mu} D \quad (1.12)$$

donde: τ : esfuerzo cortante aplicado.

λ : tiempo de relajación.

$\dot{\tau}$: gradiente de esfuerzos cortantes (μ/G).

$\bar{\mu}$: viscosidad aparente.

G : módulo de rigidez (Pa).

D: velocidad de deformación.

Ejemplos de fluidos viscoelásticos son la nata, la gelatina, los helados, etc.

Cuadro N°1.1. Comportamiento de los fluidos.

Fluido	Comportamiento	Depende del Tiempo	Esfuerzo de Cedencia	Denominación	Viscosidad	Histéresis	Ley	
Viscoso	Newtoniano	NO	NO	Newtoniano	CONSTANTE	NO	LINEAL	
	No Newtoniano	NO	NO	Pseudoplástico	DISMINUYE	NO	POTENCIA ($n > 1$)	
				Dilatante	AUMENTA	NO	POTENCIA ($n < 1$)	
		SI	NO	SI	Plástico	DISMINUYE	NO	BINGHAM/ CASSON
				Tixotrópico	DISMINUYE	SI	EXPONENCIAL	
	Reopéctico	AUMENTA	SI	EXPONENCIAL				
Viscoelástico	Viscoelástico	SI	NO	Viscoelástico Lineal	CONSTANTE	NO	MAXWELL	
				Viscoelástico No lineal	VARIABLE	NO	MAXWELL	

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II : PARÁMETROS FÍSICOS Y REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO

2.1 REOMETRÍA

El término “reometría” es usado frecuentemente para referirse a un grupo de técnicas experimentales para investigar el comportamiento reológico de los materiales (fluidos o sólidos) [13]. Es de gran importancia en la determinación de la ecuación constitutiva de un fluido o en la evaluación de la relevancia de cualquier ley constitutiva.

La idea que apunala la reometría es producir flujos dónde los campos de esfuerzo y/o deformación son conocidos de antemano, lo que hace posible deducir propiedades reológicas a partir de las medidas de las propiedades del flujo. Un reómetro normalmente es un artefacto que puede ejercer un torque o una fuerza sobre un material y aproximadamente medir su respuesta en el tiempo (o inversamente, puede imponer una deformación y medir el torque resultante).

2.2 MEDICIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS

Los instrumentos utilizados para medir las propiedades reológicas son llamados reómetros. Éstos permiten realizar una caracterización reológica completa, incluyendo la medición de la elasticidad y del límite de fluidez [11].

En su mayoría, los reómetros funcionan a esfuerzos controlados (CS) o a velocidad de corte controlada (CR).

A pesar de la importancia, versatilidad y gran cantidad de información que se puede obtener usando un reómetro, es mucho más común oír hablar de “viscosímetros”. El término “viscosímetro” está limitado a dispositivos que sólo miden la viscosidad.

Los diferentes reómetros que existen en el mercado pueden clasificarse de diferentes maneras:

2.2.1 De acuerdo al sistema de medición

Pueden ser “relativos” o “absolutos”.

a) Reómetros Absolutos

Se caracterizan por:

- Condiciones del ensayo muy controladas: gradiente de velocidad, flujo laminar, etc.
- Se miden magnitudes físicas
- Se obtiene la viscosidad mediante fórmulas matemáticas, sin correlaciones o calibraciones.
- Permite la posibilidad de medir curvas de fluidez.

Por estos motivos, sus medidas son exactas.

b) Reómetros Relativos

Se caracterizan por:

- Condiciones del ensayo no tan controladas
- Se miden magnitudes físicas
- Obtienen viscosidad mediante correlaciones/calibraciones
- La velocidad de corte no es constante

Por lo tanto, no es útil para obtener curvas de flujo

2.2.2 De acuerdo a su geometría

Pueden ser: capilar, cilindros concéntricos, plato y cono, y platos paralelos.

Todas las geometrías deben cumplir tres requisitos: que el fluido presente flujo laminar, que la operación sea isoterma y que no exista deslizamiento en la interfase sólido-fluido.

a) Reómetros capilares

Se basa en el hecho de que cuando un fluido fluye a través de un tubo forma un gradiente de velocidad y se induce un cizallamiento o esfuerzo de corte. El fluido puede fluir por acción de la gravedad o por efecto de una presión dada. Si se conocen el caudal volumétrico, las dimensiones del tubo y la presión aplicada se pueden construir las curvas de fluidez y calcular los valores aparentes de la viscosidad.

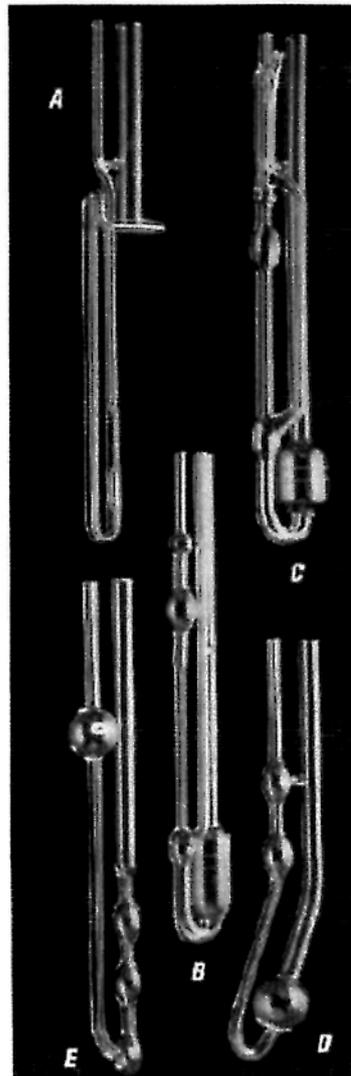


Figura 2.1: Reómetros Capilares de vidrio.

Fuente: Referencia Bibliográfica [3].

b) Reómetro Plato-Cono y Plato-Plato

Es un tipo de reómetro rotacional que consta que un plato circular plano y de un cono (plato-cono) u otro plato plano (plato-plato o platos paralelos). El ángulo del cono es de 3° o menor para evitar distorsiones en los resultados debido al efecto de borde.

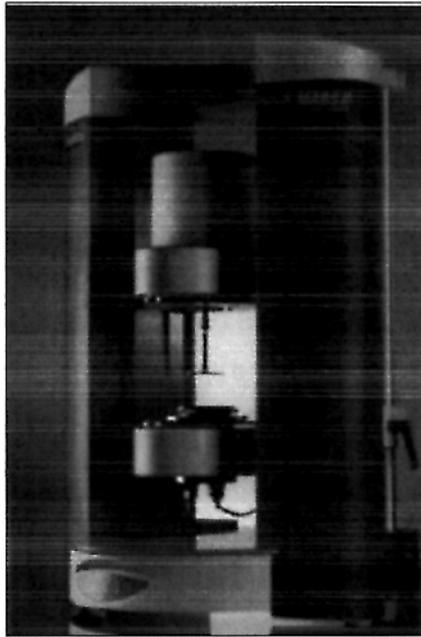


Figura 2.2: Reómetro tipo plato-plato.

Fuente: Referencia Bibliográfica [3].

c) Reómetro de cilindros concéntricos

Consta de un vaso de medición cilíndrico (de radio R_a) que contiene en su interior un cilindro (de radio R_i) de forma que el fluido queda atrapado en la corona anular que dejan el vaso y el cilindro interior. Durante la operación de medida, el cilindro interior o el vaso giran a una velocidad constante, mientras el otro permanece fijo. En estas condiciones el par transmitido por el elemento móvil hacia el fijo, a través del fluido, será constante.



Figura 2.3: Reómetro de cilindros concéntricos.

Fuente: Referencia Bibliográfica [3].

Si es el vaso de medición el que gira, permaneciendo el cilindro interior fijo, se denomina "**Sistema Couette**", mientras que si es al revés, es decir, el cilindro interior gira y el vaso permanece fijo se denomina "**Sistema Searle**". La transición de flujo laminar a turbulento ocurre a velocidades de giro más elevadas en el sistema Couette que en el Searle.

2.2.3 De acuerdo a su funcionamiento

Pueden clasificarse en rotacionales y tipo tubo.

a) Reómetros rotacionales

Son equipos muy versátiles que pueden estudiar el comportamiento reológico en cualquier rango incluso en fluidos con partículas en suspensión. Son de gran precisión. Pueden estudiar incluso fluidos viscoelásticos. Se basan en un elemento rotacional que impone una determinada velocidad de rotación para la que se calcula la velocidad de corte correspondiente y el esfuerzo cortante que requiere del elemento motor.

Los principales reómetros rotacionales son:

- Los de cilindros concéntricos y platos; tienen un rango de aplicación muy grande. Por su geometría τ y θ pueden ser deducidos muy fácilmente. Son aparatos de precisión, normalmente automatizados y por ello son de costo elevado. No son adecuados para medir fluidos con partículas en suspensión.
- Los de aspas o de agitador; son probablemente los más versátiles, pero por su geometría, la relación τ - θ no puede ser deducida directamente, sino que el dispositivo ha de ser previamente calibrado con un fluido de reología conocida en el rango a ensayar.

Los instrumentos rotatorios pueden operarse en modo de corte permanente (velocidad angular constante) u oscilatorio (dinámico). Los sistemas rotatorios son generalmente utilizados para investigar el comportamiento dependiente del tiempo porque los sistemas de tubo sólo permiten un paso del material a través del aparato.

b) Reómetros tipo tubo

Son más sencillos y dan buenos resultados cuando el fluido está libre de partículas en suspensión y el rango de viscosidad a medir es moderado. No sirven para medir fluidos dependientes del tiempo.

Hay tres tipos:

- Tipo Canon-Fenske; un tubo capilar de cristal en el que el fluido cae por gravedad. Sólo sirve para fluidos newtonianos, a un único τ . El rango de aplicación es limitado
- Capilar a alta presión; mide el caudal de fluido que se establece al establecer una presión en un extremo. Es rápido, sencillo, y requiere un caudal bajo de fluido
- Tipo tubería; como el anterior, pero usando cualquier tubería. Se basa en medir el caudal que provoca una caída de presión a través de una longitud de una tubería cualquiera. Al igual que el anterior, requiere flujo laminar, que en este caso es más difícil de conseguir que en el capilar, y el conocimiento del modelo de flujo.

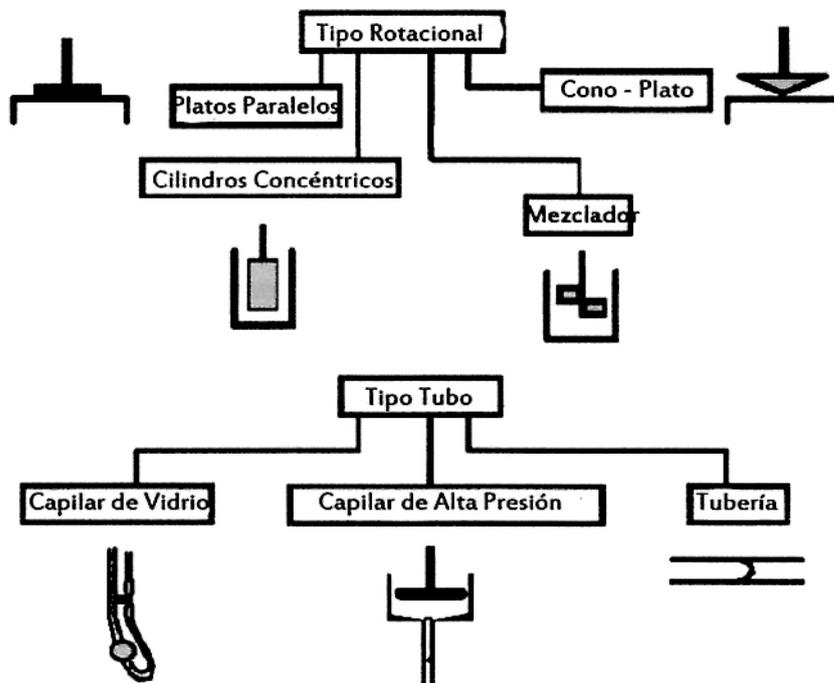


Figura 2.4: Tipos de Reómetros

Fuente: Referencia Bibliográfica [14].

Existen ventajas y desventajas asociadas con cada instrumento. Los capilares de vidrio operados por gravedad, como el tipo Canon - Fenske mostrado en Fig. 2.4, sólo son convenientes para los fluidos Newtonianos porque la razón de corte varía durante la descarga. Los sistemas de cono y placa están limitados a razones de corte moderados pero los cálculos (para ángulos de cono pequeños) son simples. Los viscosímetros tipo tubo y los tipo mezclador pueden ocuparse de partículas mucho más grandes que los de cono y placa, o placas paralelas. Con el viscosímetro tipo mezclador se minimizan los problemas asociados con fallas y degradaciones en materiales estructuralmente sensibles. Los capilares de alta presión operan a razones de corte altas pero generalmente involucran una corrección de presión final significativa.

2.2.4 La Prueba de Asentamiento

Es un procedimiento reométrico aproximado y semi-empírico que permite realizar estimaciones del esfuerzo de cedencia para materiales viscoplásticos.

Este método implica llenar un recipiente (de geometría cilíndrica o troncocónica), con el material a ser ensayado, levantar el recipiente y permitir al material fluir bajo su propio peso.

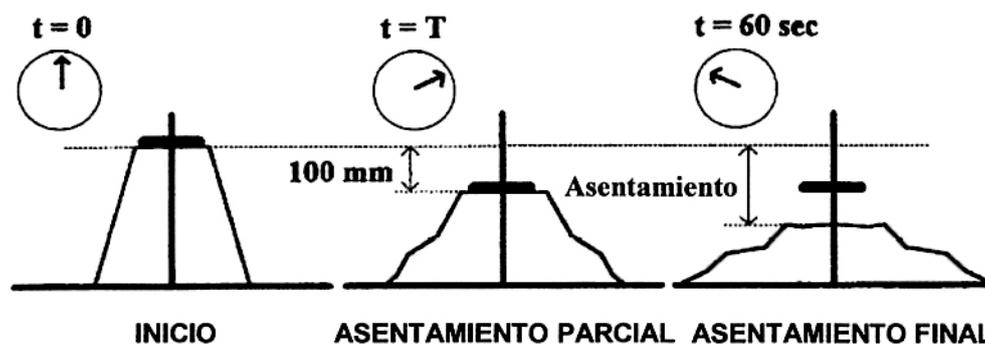


Figura 2.5: Prueba de Asentamiento. Geometría Troncocónica.

Fuente: Referencia Bibliográfica [7].

La geometría cilíndrica presenta ciertas características propias de su geometría que le dan ventajas comparativas, aún en el análisis, respecto a la geometría troncocónica. La primera, y tal vez la más simple, es la homogeneidad geométrica de sus secciones transversales, siendo todas de forma circular y radio constante (en una geometría troncocónica, el radio varía en función de la

altura). Aprovechando esta característica podemos realizar un análisis inicial del evento.

Como se sabe, la presión en un punto cualquiera de un fluido es igual a la columna de fluido que se encuentra sobre ese punto; además, de acuerdo al Principio de Pascal, la presión en dicho punto será igual a la presión en cualquier punto que se encuentre a la misma profundidad. Por tanto, para un área unitaria podremos afirmar que:

$$\tau = \rho gh \quad (2.1)$$

Ahora supongamos que existe "algo" que impide fluir a nuestra columna de fluido. Mientras la presión no sea lo suficientemente fuerte para vencer a ese "algo", la sustancia no podrá fluir; en otras palabras, "solamente cuando la presión sea lo suficientemente grande para vencer al esfuerzo de cedencia, la sustancia fluirá y tenderá a tomar su ángulo de equilibrio". Con este concepto pasemos a analizar gráficamente los resultados de una prueba de asentamiento:



Figura 2.6: Esfuerzo de cedencia en un cilindro colapsado.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fig 2.6 se puede apreciar el perfil del amontonamiento final del material. En este perfil se distinguen dos zonas bien diferenciadas: la primera mantiene su geometría cilíndrica mientras que la segunda ha cedido y muestra un ángulo de equilibrio, siendo la geometría final troncocónica. La primera zona no ha llegado a fallar porque la carga que soportaba era menor que su esfuerzo de cedencia; el punto en el cual se produce el cambio de pendiente es aquél en el cual la carga ha empezado a superar dicho esfuerzo y por tanto podemos afirmar que "la altura de la zona cilíndrica representa al esfuerzo de cedencia". De esta

manera, si por algún método se logra medir dicha altura entonces, se habrá medido el esfuerzo de cedencia del fluido.

En este primer análisis debemos considerar el efecto mismo de la viscosidad del fluido, que se manifiesta con una pequeña alteración en la altura final visualizada producto del arrastre entre láminas fluidas, así como la fricción del fluido sobre la superficie en contacto. Este hecho hace necesario calibrar el valor final del esfuerzo de cedencia, introduciendo un coeficiente de proporcionalidad adecuado.

Un segundo análisis ha sido realizado por Pashias y Boger (1996), quienes relacionando el perfil del amontonamiento final del material así como la diferencia (\pm) entre las alturas inicial y final del cilindro con el esfuerzo de cedencia, han encontrado:

$$\frac{s}{h} = 1 - 2 \frac{\tau_y}{\rho gh} \left(1 - \ln \left(2 \frac{\tau_y}{\rho gh} \right) \right) \quad (2.2)$$

donde s es el asentamiento, h es la altura original del cilindro, ρ la densidad del material.

Esta expresión puede ser escrita de manera adimensional como:

$$h' = 1 - 2\tau' (1 - \ln(2\tau')) \quad (2.3)$$

Durante la contrastación de su fórmula teórica, Pashias y Boger encontraron una desviación de la curva teórica para valores del esfuerzo de cedencia mayores a $0.15\rho gh$, mientras que, para valores del esfuerzo de cedencia menores a $0.15\rho gh$ (o para $s/h > 0.4$), la incertidumbre fue menor al 10%. Esta desviación para valores de esfuerzo de cedencia altos probablemente se deba a la no consideración del comportamiento elastoplástico en materiales muy cohesivos.

Paralelamente, Coussot (1996) realizó una investigación bajo otro punto de análisis. Coussot analizó la forma del depósito, encontrando que el perfil de la superficie libre (razón entre la altura material "y" y la distancia del borde "x") sólo depende del esfuerzo de cedencia.

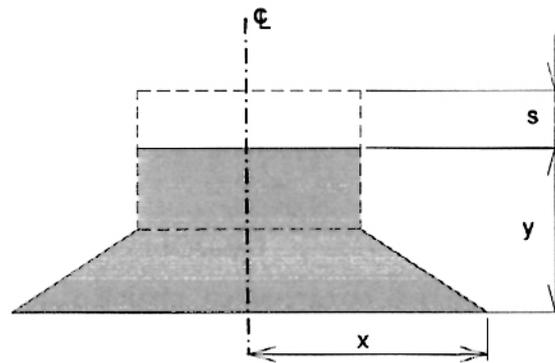


Figura 2.7: Variables definidas por Coussot.

Fuente: Elaboración propia.

Así, para una superficie horizontal llana, el perfil de la superficie libre tiene la expresión siguiente

$$\frac{\rho g y}{\tau_y} = \sqrt{2 \frac{\rho g x}{\tau_y}} \quad (2.4)$$

El autor contrastó las mediciones de un reómetro de placas paralelas y las medidas de perfiles de superficie libre, encontrando una concordancia aceptable para las suspensiones de lodo finas y materiales de flujo detrítico, con incertidumbres menores al 20%, dentro de los límites de incertidumbre aceptable para medidas reométricas; sin embargo, los resultados son muy vulnerables al redondeo, por lo cual se recomienda que las alturas de montículo sean mucho mayores que la extensión del depósito: $h - s \gg \tau_y / (\rho g)$. Aún así, la mayor ventaja del método propuesto por Coussot (1996) es que puede extenderse a condiciones de borde y reologías diferentes.

Más recientemente, Coussot y Roussel (2005) realizaron un nuevo análisis bajo similares criterios que Pashias y Boger (1996), pero analizando el problema en tres dimensiones, obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{s}{h} = 1 - \sqrt{3} \frac{\tau_y}{\rho g h} \left(1 - \ln \left(\sqrt{3} \frac{\tau_y}{\rho g h} \right) \right) \quad (2.5)$$

la cual difiere de la Ecuación 2.2 en el valor $\sqrt{3}$.

Las calibraciones realizadas por los autores para diferentes tipos de materiales muestran que el valor en discusión es efectivamente $\sqrt{3}$, con lo cual se introduce una importante corrección al planteamiento de Pashias y Boger (1996).

2.3 SISTEMA SÓLIDO - LÍQUIDO

Toda sustancia sólida, o líquida, o gaseosa se denomina "sistema de una fase" o "monofásico". Si combinamos sustancias en diferente estado, estaremos ante un "sistema multifásico". Las características del sistema resultante difiere de las características de cada fase independiente, por eso la importancia de su estudio.

Un sistema sólido-líquido es simplemente un sistema de dos fases, una sólida y otra líquida, que funcionan como una nueva sustancia. Algunos ejemplos de sistemas sólido-líquido son: barro, soluciones de relaves, pulpas, etc.

El estudio del transporte de estos materiales hace importante el estudio de los llamados "flujos sólido - líquido".

2.4 PROPIEDADES REOLOGICAS Y PARÁMETROS REOLÓGICOS

Las propiedades reológicas son características físicas que describen el comportamiento de deformación y fluidez de un cuerpo ante la sollicitación de esfuerzos externos. Entre las propiedades fundamentales se cuenta la elasticidad, la plasticidad, la viscosidad y la solidez [12].

A su vez, las propiedades reológicas de un fluido se cuantifican mediante parámetros. Los parámetros reológicos (k y n) relacionados por los modelos reológicos describen a los fluidos: el valor de k refleja una medida de consistencia del fluido, siendo que un valor alto representa un material muy consistente, mientras que el exponente n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano (a una mayor desviación de "n" respecto a la unidad, le corresponde un mayor alejamiento del comportamiento newtoniano). Así mismo, el esfuerzo de corte (τ), es la fuerza que se le aplica a un fluido para deformarlo, la que se da a una velocidad de deformación ($\dot{\theta}$) dado en s^{-1} .

De esta manera, en el modelo de Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_y + K(\dot{\theta})^n$), los parámetros serán

τ_y : esfuerzo de cedencia (Pa)

τ : esfuerzo de corte (Pa)

$\dot{\theta}$: Velocidad de deformación (s^{-1})
k : coeficiente de consistencia ($Ns^n m^{-2}$)
n : índice de deformación del fluido

2.5 RELAVES MINEROS

Se definen como el desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo [12].

Esta definición excluye otras formas de desechos mineros producidos en forma sólida, tales como desmontes de mina, desmontes de pila de lixiviación, escorias, relaves de lavaderos, relaves de cianurización, etc.

2.5.1. Características Físicas

Al igual que los suelos naturales los relaves están formados por un conjunto discontinuo de partículas, por lo que constituye un sistema en el que se distinguen tres fases: sólidos, líquidos y gases; sin embargo, y para los fines de la presente investigación, se considerará conformado por sus dos fases principales: sólida y líquida, funcionando como un sistema bifásico.

A continuación se presentan las diferentes propiedades físicas de los relaves.

a) POROSIDAD (η)

Es la relación entre el volumen de vacíos (V_v) y el volumen total (V). La porosidad de los medios porosos tiene un valor entre 0 y 1, pudiendo expresarse esta cantidad también en porcentajes. La porosidad de los relaves suele encontrarse entre 0.2 y 0.7, que en porcentaje equivale a 20% y 70%. La porosidad de los relaves se caracteriza por ser muy variable pues está relacionado con un gran número de propiedades físicas del suelo.

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (2.6)$$

b) ÍNDICE DE POROS

Es el cociente entre el volumen de vacíos (V_v) y el de partículas sólidas (V_s). El índice de poros se expresa en forma decimal. Los relaves se caracterizan por presentar un índice de poros muy variable desde 0.8 a 3 según el tipo de material geológico y proceso metalúrgico que lo haya originado.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.7)$$

c) HUMEDAD (w)

Es el peso de agua (W_w) dividido por el peso de partículas sólidas (W_s) de un elemento de un medio poroso (relaves, suelo, roca, etc). La humedad de los relaves tiene un valor generalmente entre 0 y 1, aunque también puede tomar valores superiores a la unidad. Puede expresarse en porcentajes.

Se caracteriza por presentar valores muy diferentes en un mismo residuo minero y depende fundamentalmente de la composición del material y de las condiciones climáticas o de almacenamiento.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.8)$$

d) PESO ESPECÍFICO DEL MEDIO POROSO O DENSIDAD NATURAL (γ)

Corresponde a la mezcla de partículas sólidas, agua y aire. Es el peso de un elemento de relave o suelo (W) dividido por el volumen (V) de dicho elemento. Se expresa en g/cm^3 o ton/m^3 . Su valor será siempre mucho menor que el peso específico de las partículas sólidas. El mayor valor del peso específico del relave se alcanza cuando éste está totalmente saturado y el menor cuando está totalmente seco. El rango típico de valores es muy amplio, en función del tipo de residuos, de la profundidad y de la consolidación que presenta la muestra.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.9)$$

e) PESO ESPECÍFICO SECO

Es el peso de las partículas sólidas dividido por el volumen total de la muestra de relave o suelo. El peso específico seco se expresa en g/cm³ o ton/m³. Presenta valores muy diferentes en función del tipo de residuo.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2.10)$$

f) PESO ESPECÍFICO DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

Expresa la relación entre el peso total de los sólidos y el volumen de los sólidos y se expresa en g/cm³. El valor de este es quizás uno de los que presentan el rango de variación más grande dentro de las propiedades de los residuos y depende en gran medida de la composición mineralógica y química del residuo. Su determinación se realiza por el método del picnómetro.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2.11)$$

g) GRADO DE SATURACIÓN

Indica el porcentaje del volumen de huecos o vacíos (V_v) que está relleno de líquido. Se determina por la relación entre el volumen de agua (V_w) y el volumen de vacíos (V_v). Puede expresarse en porcentajes.

Un valor del grado de saturación igual a cero indica que el relave está seco, un valor igual a uno indica que está saturado y un valor entre cero y uno indica que está no saturado.

No hay valores típicos para relaves.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.12)$$

Si se conocen la humedad, el índice de poros y el peso específico de las partículas sólidas, el grado de saturación se puede determinar por la siguiente expresión:

$$S_r = \frac{w\gamma_s}{e\gamma_w} \quad (2.13)$$

h) ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

Es el área de las superficie de las partículas por unidad de volumen total de la muestra (V), por unidad de masa (M_s) o por volumen de las partículas sólidas (V_s). Las expresiones matemáticas son las siguientes:

$$s_{vt} = \frac{A_s}{V} \quad (2.14)$$

$$s_m = \frac{A_s}{M_s} \quad (2.15)$$

$$s_{vs} = \frac{A_s}{V_s} \quad (2.16)$$

donde s_{vt} es el área superficial específica por unidad de volumen, s_m es el área superficial por unidad de masa de sólidos y s_{vs} es el área superficial específica por unidad de volumen de las partículas sólidas.

El área superficial de las partículas se puede determinar por el método de inyección en la muestra de nitrógeno líquido, o se puede estimar conociendo la granulometría de las partículas.

Cuadro N°2.1. Características físicas de residuos minero-metalúrgicos almacenados en presas y escombreras. Valores medios.

Mineral extraído	Localidad-país	γ (g/cm ³)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Referencia
Ni y Co	Moa - Cuba	3.97	10	70	20	Rodriguez, et al 1998
Ni y Co	Mayari - Cuba	3.81				Heredia 1980
Fe	Hamersley - Australia	3.5	42	54	4	Swarbrick, et al., 1992
Fe	Newman - Australia	3.7	29	58	13	Swarbrick, et al., 1992
C	Riverside - Australia	1.74	39	49	12	Swarbrick, et al., 1992
C	Wambo - Australia	1.86	57	35	8	Swarbrick, et al., 1992
Al	Weipa - Australia	2.85	32	40	28	Swarbrick, et al., 1992
Fe	Fernandinho - Brasil	3.6	8	70	22	Tibana and Campos 1998
Cu, S, Zn	Aznalcólar - España					
	Estéril	3.1	1	96.6	2.4	López, 1999
	Lodos	4.5		98	2	Lloret et al., 1999

Fuente: Referencia bibliográfica [12]

i) MORFOLOGÍA DE LAS PARTÍCULAS

Los relaves presentan una morfología muy irregular. La irregularidad de las partículas está determinada por los procesos mecánicos a que se somete a la roca en el proceso minero-metalúrgico. Además, usualmente no se observan partículas muy redondeadas en los relaves porque estas no sufren un proceso prolongado de meteorización, transporte y deposición como le sucede a los suelos naturales.

En las presas de relaves se produce un proceso de clasificación y sedimentación de las partículas sólidas de acuerdo a su tamaño. La distribución espacial está condicionada por el tipo de presa que se utilice, mientras que la distribución espacial del tamaño granulométrico intermedio y fino en el interior de la presa es muy irregular pues no existe un método estandarizado de vertido. La irregularidad y particularidad en el vertido de estos lodos da lugar a características estratigráficas que se pueden observar en ellos.

j) GRANULOMETRÍA

Las partículas sólidas se caracterizan por presentar diferentes tamaños. Su tamaño en muchos casos está condicionado por:

1. El depósito mineral original y la roca encajante,
2. El proceso minero-metalúrgico que ha sufrido la masa mineral y
3. El tipo de residuo.

La distribución de partículas por tamaño en una muestra de relave o suelo se expresa mediante una "curva granulométrica". Con ella se pueden determinar parámetros como:

Coefficiente de uniformidad (Cu): se determina por el cociente entre el diámetro por debajo del cual en la curva granulométrica queda el 60% del peso de la masa del sólido (D_{60}) y el diámetro por debajo del cual queda el 10% de la masa del sólido (D_{10}). Materiales con bajo coeficiente de uniformidad tienen porosidades elevadas mientras que los materiales bien graduados tienen porosidades menores.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.17)$$

Diámetro medio de las partículas (D_{50}): se corresponde con el diámetro en la curva granulométrica por debajo de la cual se encuentra el 50% en peso de la muestra.

En la determinación de la granulometría se emplean diferentes métodos:

1. Análisis granulométrico por tamizado (partículas superiores a 0.06 mm).
2. Análisis hidrométrico (partículas más pequeñas a 0.06 mm)
3. Análisis por láser (partículas con tamaño entre 0.5 y 0.0005 mm).

El tamaño de las partículas de los residuos varía desde 1×10^{-6} mm (10 Å) hasta bloques de rocas de varios metros de espesor (cuadro N°2.2).

Cuadro N°2.2. Dimensiones de las partículas según su rango de tamaño (modificado de Lambe and Whitman, 1990).

Partículas	Tamaño
Bloques	> 30 cm
Bolos	15 a 30 cm
Grava	2 a 15 cm
Arena	0.06 a 2 mm
Limo	0.002 a 0.06 mm
Fracción Arcillosa	< 0.002mm
Coloides	< 0.00045mm

Fuente: Referencia bibliográfica [12]

2.5.2. Características Químicas

Éstas pueden variar ampliamente de un yacimiento a otro. Una de las causas es el hecho de que en una mina pueden explotarse diferentes depósitos, cada uno con distinta geoquímica, ocasionando variaciones en las características químicas de los relaves producidos.

a) Relaves Sólidos

Para muchos depósitos minerales polimetálicos altamente sulfurados en el Perú, las diferencias en la gravedad específica de las partículas de minerales individuales pueden afectar la distribución de varios metales, incluyendo la de pirita, de acuerdo a las diferentes fracciones de tamaño de los relaves. Según la Guía Ambiental para el Manejo de Relaves del Ministerio de Energía y Minas (2007) la experiencia ha mostrado que las partículas sulfurosas más pesadas son separadas preferencialmente con las partículas más gruesas durante el procesamiento en la concentradora, en tal forma que ello ocasionaba la sobremolienda de los sulfuros a partículas mucho más finas. Esto, tiende a concentrar los minerales más pesados tales como galena y pirita en las partículas finas de

los relaves. Este efecto de tamaño de partícula y densidad tiene influencia en la distribución granulométrica de la concentración de metal sólido dentro del depósito de relaves, y las propiedades estructurales relacionadas con el tamaño de la partícula, tales como permeabilidad y la retención de humedad por largo tiempo; también pueden afectar la movilidad de cualquier especie metálica soluble así como la generación y movilidad de productos de la oxidación de sulfuros.

b) Efluentes Líquidos de Flotación

La primera consideración relacionada a los efluentes líquidos y su calidad, es el contenido de sólidos muy finos en suspensión el cual es usualmente medido como sólidos totales en suspensión (TSS) o menos frecuentemente como unidades de turbidez. Los niveles elevados de TSS en los efluentes descargados en algunas minas en el Perú resultan de la retención por tiempo limitado y sedimentación en pequeños depósitos. Estos contenidos son más fáciles de reducir si se incrementa el tiempo de retención en los depósitos mencionados para este propósito y se recircula el agua del proceso hacia la concentradora, eliminando del todo la descarga de agua de este depósito. Por otro lado, los floculantes (polímeros sintéticos) coagulantes (Fe, Al y sales) y reactivos químicos para ajustar el pH (cal) pueden ayudar a la reducción de las partículas suspendidas. La filtración a través de filtros de arena, que pueden utilizar las arenas de relaves cicloneados como medio filtrante, han sido también sugeridas como un medio para reducir las partículas ultra-finas en suspensión.

Los residuos de reactivos utilizados en flotación acompañan tanto a los relaves sólidos como a los líquidos descargados con los relaves. Los reactivos de flotación pueden ser cal, ditiofosfatos, xantatos, cromatos, sulfitos, sulfato de cobre, sulfato de zinc, ácidos grasos, alcoholes, aceites y cianuro entre otros, dependiendo del requerimiento metalúrgico específico de cada operación. Con la excepción del cianuro la mayoría de los demás reactivos de flotación existen en formas no tóxicas para los humanos y la vida acuática.

El proceso de flotación puede también liberar otros constituyentes en solución, dependiendo de la extensión en la cual éstos puedan estar presentes en el mineral y de su solubilidad. Esto incluye frecuentemente sulfatos y cloruros pero

a menudo dentro de límites aceptables para agua potable y usos acuáticos. Más importantes pueden ser los metales potencialmente tóxicos, como arsénico y selenio que pueden ser solubles cerca del pH neutro. Aún los niveles ligeramente elevados de cobre, plata, plomo, aluminio y zinc en solución pueden ser especialmente dañinos para los peces salmónidos, además del riesgo potencial de ser acumulados en los tejidos de los organismos marinos.

Algunos de estos metales pueden ser tóxicos para el consumo humano en mayores concentraciones; otros metales como el cobalto, molibdeno, y níquel pueden afectar adversamente el crecimiento de las plantas o del ganado si están presentes en las aguas usadas para irrigación.

Las pruebas para estimar el tipo y concentración de tales constituyentes solubles se realizan con anterioridad al arranque de la concentradora, utilizando muestras de relaves que se han tenido en agua por varias semanas o varios meses.

Otras variables son el pH y la exposición a la atmósfera y puede por ello ser difícil reproducir en la prueba todo el rango de condiciones reales. Durante la operación de la concentradora el pH es usualmente mantenido en el rango de 8 a 11, lo cual disminuye la solubilidad de muchos metales; sin embargo, el pH de las aguas del depósito será casi neutro en el largo plazo. Finalmente, las pruebas con muestras a nivel de planta piloto no contendrán, generalmente, concentraciones de nitratos procedentes de los agentes explosivos que están en cambio presentes en las operaciones actuales de las minas. Estos factores producen considerable duda en la predicción de la calidad de los efluentes en el corto y largo plazo.

Es difícil predecir exactamente el contenido metálico del efluente con anterioridad a la operación y los rangos que pueden presentarse. Las especies solubles son liberadas por la exposición del mineral al aire y al agua junto con niveles altos de pirita. La oxidación se produce con la trituración y la molienda en el ambiente atmosférico, resultando en que las corrientes de efluentes tienen metales disueltos.

En conclusión, si los relaves son susceptibles de generar ácido a partir de la oxidación de sulfuros después de su deposición en el depósito, entonces pueden

presentarse problemas muy serios debido a la generación de drenaje ácido (ARD).

c) Efluentes Cianurados

El cianuro de sodio es usado como lixiviante en la mayoría de las operaciones para beneficiar oro y plata, y también como reactivo en los procesos de flotación.

El cianuro en los efluentes de los relaves incluye cianuro libre (CN y HCN), así como formas complejas en asociación con varios metales que tiene variada solubilidad y toxicidad. El cianuro libre es químicamente inestable. Por lo tanto, a diferencia de muchos otros contaminantes, no persiste en el ambiente ni tampoco es bio acumulable a través de la cadena alimenticia.

En la degradación del cianuro libre participan diferentes procesos naturales, como la volatilización, oxidación, fotodescomposición, y degradación microbiana. De éstos, la volatilización es la más importante y se incrementa notablemente conforme el pH inicialmente alcalino de los efluentes cianurados se va transformando en neutro a medida que el tiempo de retención en el depósito de relaves se incrementa.

El cianuro usado en pequeñas cantidades como un reactivo de flotación para la depresión del cobre, por ejemplo, en circuitos de cobre y plomo, resulta típicamente en concentraciones de 5 a 10 mg/l en los efluentes de los relaves (Von Michaelis, 1984); estas concentraciones son casi siempre rápidamente reducidas por los procesos naturales en las pozas de decantación de los depósitos de relaves y alcanzan niveles por debajo de los estándares de agua bebible establecidos por la EPA, que son de cerca de 0.2 mg/l de cianuro libre (CN⁻). Por razones similares, el cianuro de flotación es rara vez medido en concentraciones detectables en las pruebas de envejecimiento de relaves de lixiviación. Como resultado, los procesos naturales son usualmente considerados adecuados para mitigar los efectos ambientales del cianuro de los relaves de flotación, excepto cuando hay poco o ningún tiempo de retención en el depósito, con anterioridad a la descarga.

En la extracción de oro y plata, el cianuro se usa en concentraciones de varios cientos de miligramos por litro, siendo insuficientes los procesos naturales de

degradación y pudiendo permanecer en concentraciones de 1 a 30 mg/l en las pozas de relaves donde se decanta el agua. Estos niveles pueden ser tóxicos para los animales acuáticos y terrestres y exceder los niveles aceptables para agua bebible. Por tanto, se debe controlar la infiltración de los depósitos durante la operación, a fin de proteger el agua del subsuelo. Si se llega a realizar la descarga de los efluentes a aguas superficiales, deberá considerarse algún método disponible para la destrucción del cianuro, tales como la clorinación alcalina, el proceso INCO anhídrido sulfuroso-aire, el proceso Degussa de peróxido de hidrógeno, acidificación, y tratamiento en bioreactores bacterianos.

Los problemas de cianuro en el manejo de los relaves de cianuración de oro y plata se presentan mayormente en el corto plazo, durante las fases de operación, y en menor medida, en la fase de clausura. En el largo plazo durante el período de post-clausura, la degradación natural del cianuro es suficiente para restringir el potencial de su impacto sobre el ambiente.

d) Drenaje Acido de Relaves (ARD)

El ARD se refiere a procesos por los cuales el pH del agua en contacto con los relaves puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos tales como arsénico, plomo, cadmio, y un conjunto de otros, además un drástico incremento del contenido de los sulfatos. Es casi imposible detener completamente el proceso una vez que se ha iniciado, y los efectos de la acidificación pueden durar muchos siglos, por lo que el ARD es el tema ambiental potencialmente más dañino y difícil de tratar, pudiendo no ser evidente aún muchos años después del período de cierre de operaciones.

El potencial para ARD es específico para cada cuerpo mineralizado y para sus condiciones físicas y climáticas; no hay reglas generales para predecirla, en cualquier depósito sin el auxilio de pruebas geoquímicas. Existen, sin embargo, varios requisitos para que este proceso ocurra.

La primera condición necesaria para el ARD es que exista presencia de minerales sulfurados, como la pirita, la pirrotita y la marcasita en los relaves. Esto puede ser determinado frecuentemente a partir de la información geológica respecto al cuerpo mineralizado, pero otra señal puede ser la alta gravedad específica de los relaves. Aunque los relaves de los minerales metálicos están

compuestos principalmente de minerales de silicato o carbonato con gravedad específica (Gs) de 2.65-2.85, ellos contienen al menos pequeñas cantidades de metales no recuperados y hierro del proceso de molienda (barras de acero o bolas) que típicamente resultan en una gravedad en el rango de 2.8-2.9 para los minerales bajos en sulfuros. Por contraste, los relaves altos en sulfuros a menudo exceden considerablemente este rango, con una gravedad específica que a menudo se ubica sobre 3.5, que es el caso de los relaves polimetálicos peruanos que normalmente contienen de 10 a 60% de pirita.

En presencia de aire, la segunda condición, las superficies del mineral sulfurado se oxidan en una reacción compleja que involucra varios pasos químicos ayudados por bacterias, para formar ácido sulfúrico. Sin embargo, esta reacción sólo será un problema si los relaves contienen cantidades insuficientes de minerales que consuman ácido (por ejemplo, carbonato de calcio) para neutralizarlo, lo cual es la tercera condición necesaria. La condición final es que los contaminantes producidos deben ser transportados de los depósitos de relaves hasta los terrenos receptores o aguas superficiales, usualmente por infiltración y drenaje. Si una de estas cuatro condiciones está ausente, existe la posibilidad que el problema de ARD no sea serio.

CAPITULO III : ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DEL SISTEMA SÓLIDO – LÍQUIDO

3.1. ANÁLISIS TEÓRICO

Como se mencionó en el acápite 2.2.4., en el perfil del amontonamiento final posterior a la prueba de asentamiento, se distinguen dos zonas bien diferenciadas: la primera mantiene su geometría cilíndrica mientras que la segunda ha cedido y muestra un ángulo de equilibrio, siendo la geometría final troncocónica.

La primera zona no ha llegado a fallar porque la carga que soportaba era menor que su esfuerzo de cedencia; es decir, el punto en el cual se produce el cambio de pendiente es aquél en el cual la carga ha empezado a superar dicho esfuerzo y por tanto se puede afirmar que "la altura de la zona cilíndrica representa al esfuerzo de cedencia". De esta manera:

$$\tau_y = \rho g h_0 \quad (3.1)$$

Por otro lado, en la parte inferior del perfil la mezcla ha dejado de fluir debido a que la fricción de la superficie en contacto ha reducido el esfuerzo de corte hasta el valor mínimo de cedencia. Debido a que la fricción depende de la superficie en contacto y de la carga estática del material, se puede afirmar que el esfuerzo de cedencia depende directamente de la carga de material:

$$\tau_y = \text{Carga estática} - \text{Fricción por unidad de área}$$

$$\tau_y = \rho g(h-s) - k_1 \rho g(h-s)$$

$$\tau_y = (1 - k_1) \rho g(h-s)$$

$$\tau_y = k \rho g(h-s) \quad (3.2)$$

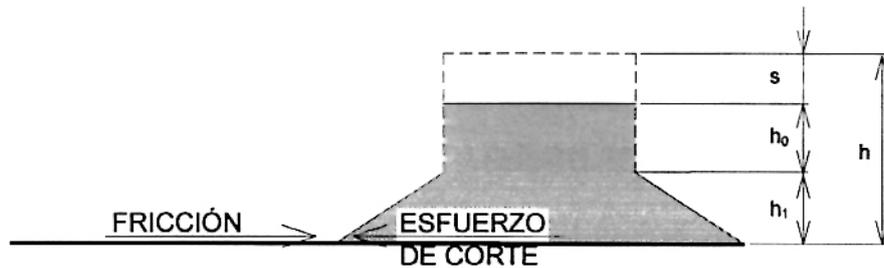


Figura 3.1: Fricción en la base del material ensayado

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la altura del cilindro elegido para el ensayo es de 4", se puede plantear la siguiente expresión en unidades CGS:

$$\tau_y = k\rho g(10.16 - s) \quad (3.3)$$

donde "k" es una constante adimensional y "s" es el asentamiento en centímetros.

De la ecuación (3.2), se concluye que el esfuerzo de cedencia depende directamente de la carga estática (peso por unidad de área); sin embargo, de manera más estricta, podemos afirmar que además varía linealmente con la altura "h". Por tanto, si el esfuerzo de cedencia es proporcional a esas dos variables, también será proporcional al producto; es decir:

$$\left. \begin{array}{l} \tau_y \propto \rho g h = \rho g(h - s) \\ \tau_y \propto h = (h - s) \end{array} \right\} \Rightarrow \tau_y \propto \rho g(h - s)^2$$

$$\tau_y = k^* \rho g(10.16 - s)^2 \quad (3.4)$$

donde "k*" tiene dimensión L⁻¹.

3.2. SELECCIÓN DEL EQUIPO

Para la presente investigación se eligió la geometría cilíndrica a escala de laboratorio, dada su mayor simplicidad, facilidad de operación y facilidad de fabricación, pues los moldes pueden ser fabricados de diferente material: cobre, acero o PVC.

El material de los cilindros se elige en función del costo y de la facilidad de obtención, optando por cilindros de PVC con abrazaderas metálicas, resultando en un costo de 3 soles la unidad. Las abrazaderas metálicas se colocaron en ambos extremos con el fin de rigidizar las paredes del tubo y a la vez facilitar su retiro durante el ensayo.

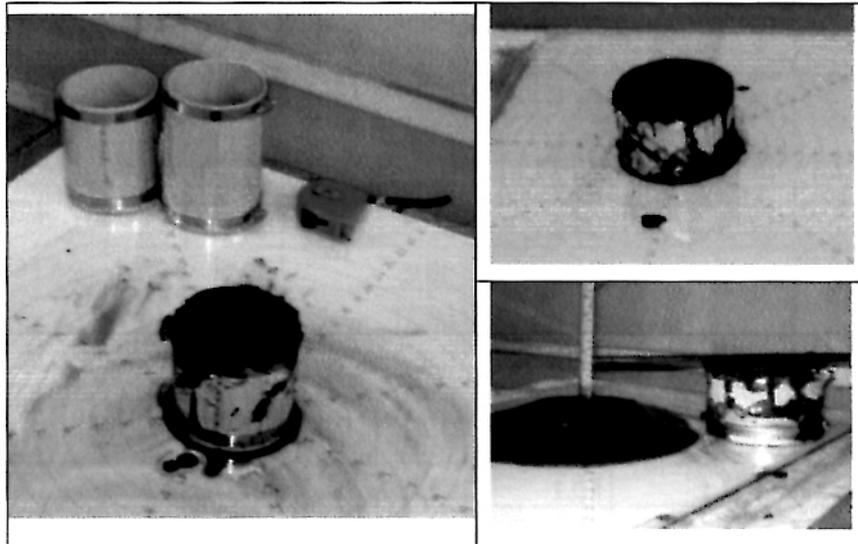


Figura 3.2: Diferentes alturas y diámetros de cilindros de prueba utilizados en los ensayos. Muestra N°1 – Compañía Minera Cobriza.

Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos iniciales se realizaron utilizando cilindros de PVC de diámetros de 4" y 6". Para definir la altura del cilindro a utilizar, se realizaron ensayos de prueba con cilindros de 10.16cm, 12.7cm y 15.24cm de altura y 4" de diámetro, con relaciones de esbeltez altura/diámetro de 1.00, 1.25 y 1.50, respectivamente; y de 12.5cm, 15cm y 17.5cm de altura y 6" de diámetro, con relaciones de esbeltez altura/diámetro de 0.83, 1.00 y 1.17, respectivamente. La elección se realizó de la siguiente manera:

- Realizados los dos primeros grupos de ensayos, se encontró que el asentamiento obtenido para cilindros de igual altura pero distinto diámetro tienden a ser aproximadamente iguales para concentraciones menores a 75%, descartándose los cilindros de 6".

Cuadro N°3.1: Altura final de las muestras ensayadas para cilindros de $\varnothing=4''$ y $\varnothing=6''$, en centímetros. Muestra M1- Minera Cobriza.

CONCENT. DE SÓLIDOS (% peso)	ALTURA DE CILINDRO		Cilindro $\varnothing=4''$		Cilindro $\varnothing=6''$	
			Asentamiento	Altura final	Asentamiento	Altura final
	pulg	cm	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
79.01%	4	10.16	3.3	6.86	2.1	8.06
	5	12.7	5.16	7.54	--	--
	6	15.24	7.26	7.98	--	--
77.51%	4	10.16	6	4.16	4.1	6.06
	5	12.7	8.18	4.52	--	--
	6	15.24	10.48	4.76	--	--
76.91%	4	10.16	7.24	2.92	5.7	4.46
	5	12.7	9.66	3.04	--	--
	6	15.24	12.06	3.18	--	--
74.50%	4	10.16	8.2	1.96	8.2	1.96
	5	12.7	10.68	2.02	--	--
	6	15.24	13.36	1.88	--	--
74.41%	4	10.16	8.52	1.64	8.5	1.66
	5	12.7	11.18	1.52	--	--
	6	15.24	13.6	1.64	--	--
70.87%	4	10.16	8.74	1.42	8.73	1.43
	5	12.7	11.36	1.34	--	--
	6	15.24	14.14	1.1	--	--

Fuente: Elaboración propia.

- Se encontró que la altura del amontonamiento final (altura del cilindro – asentamiento) variaba entre 0.32cm y 1.12cm dentro del rango de concentraciones de sólidos a trabajar. Esta variación es consecuencia de la relación entre la carga estática (que varía) y el área de la sección de apoyo (que se mantiene constante); sin embargo, dado que el esfuerzo de cedencia es una propiedad intrínseca al material y no varía a pesar del incremento de altura. Esta variación solamente trascenderá si facilita la medición del asentamiento, en caso contrario es indiferente.

Por estos motivos se optó por utilizar cilindros de PVC de $\varnothing=4''$ y $h=4''$ (10.16cm) de altura; es decir, una razón $h/\varnothing=1$ y un volumen total aproximado de 800 cm³.

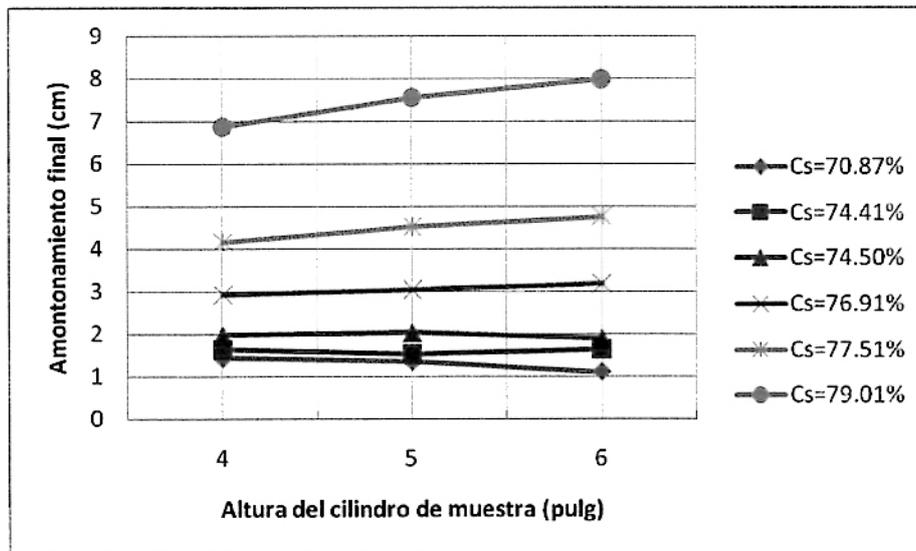


Figura 3.3: Relación entre el amontonamiento final y la altura de cilindro ensayado. Muestra N°1 – Compañía Minera Cobriza.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se estudian y caracterizan las muestras sólidas de relaves provenientes de:

- Compañía Minera Cobriza (muestra 1); relaves en pasta (concentración de sólidos entre 70 y 80%, en promedio).
- Compañía Minera Volcan (muestra 2); relaves en pulpa (concentración de sólidos entre 40 y 50 %, en promedio).

Caracterización Física

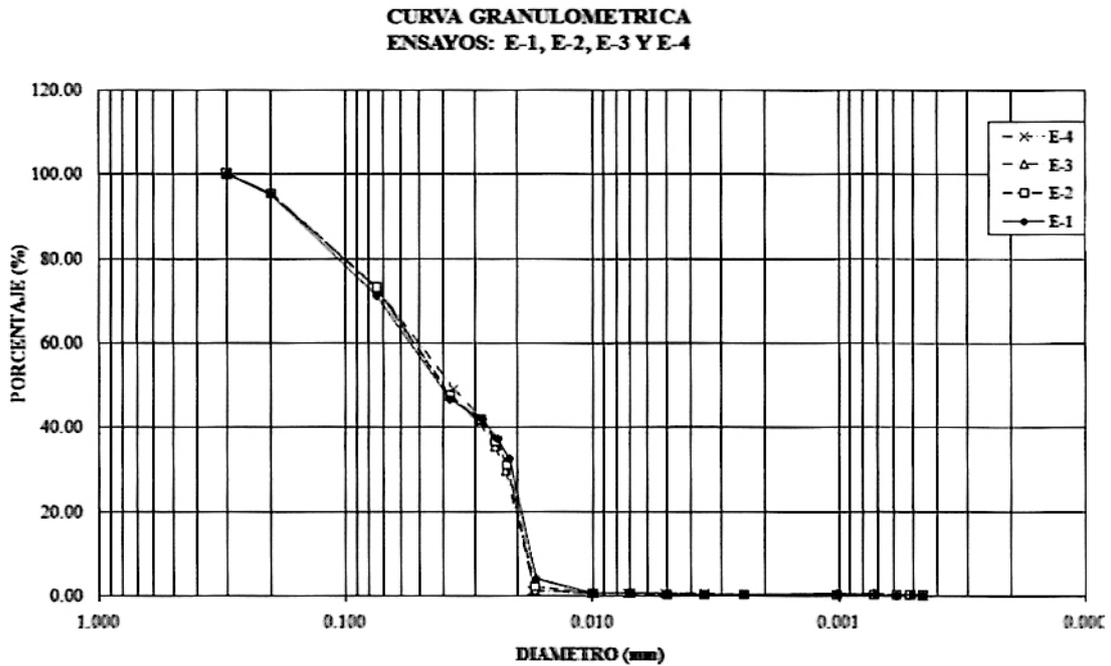
Realizado el ensayo del picnómetro, se encontró que las muestras presentan la siguiente gravedad específica

Cuadro N°3.2:Gravedad específica (Gs) de las muestras (en estado seco), en g/cm³

Muestras en estudio		Gs (g/cm ³) promedio
1	Muestra 1 :Compañía Minera Cobriza	3.63
2	Muestra 2 : Compañía Minera Volcan	2.89

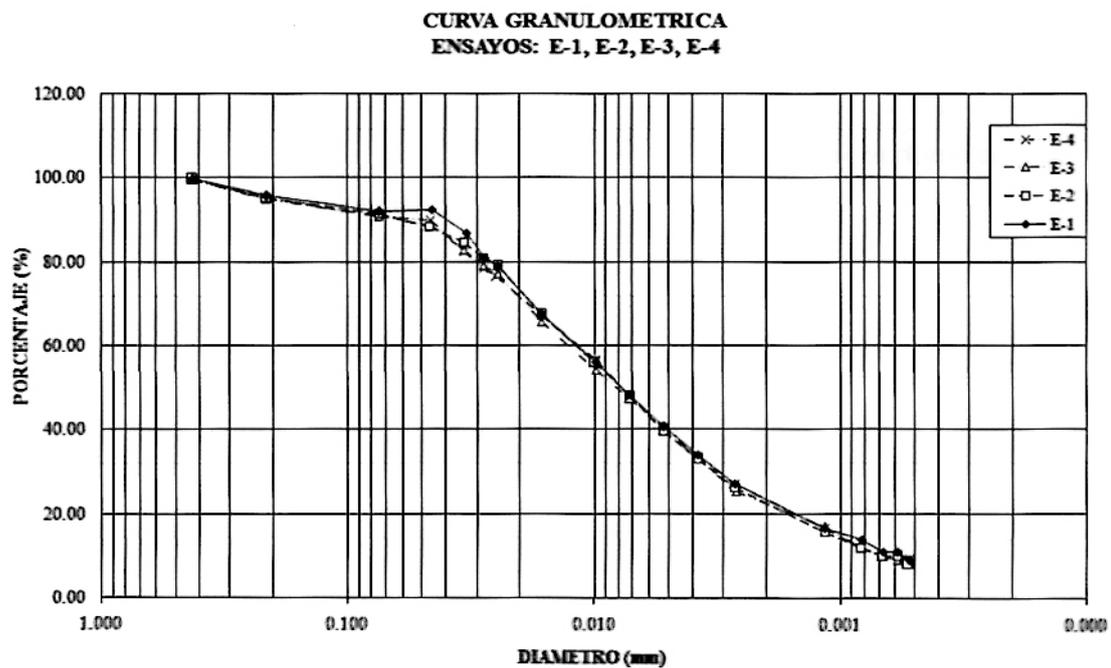
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, por medio del ensayo del hidrómetro, se establecieron las curvas granulométricas como se muestra:



**Figura 3.4: Curva Granulométrica de la Muestra N°1 – Compañía Minera
Cobrizo.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.5: Curva Granulométrica de la Muestra N°2 – Compañía Minera
Volcan.**

Fuente: Elaboración propia.

De la granulometría obtenida, se obtuvieron los valores de D_{50} y D_{90} de cada muestra, los cuales se muestran a continuación.

Cuadro N°3.3: Diámetros característicos de las muestras (en estado seco)

Muestras en estudio		D_{50} (mm)	D_{90} (mm)
1	Muestra 1 : Compañía Minera Cobriza	0.040	0.16
2	Muestra 2 : Compañía Minera Volcan	0.008	0.05

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, la Muestra 2 - Compañía Minera Volcan tiene una granulometría mucho más fina y un alto contenido de coloides, lo cual se verifica no solamente en la curva granulométrica mostrada sino también en las imágenes tomadas durante el Ensayo de Hidrómetro (Fotografía 2, Anexo A1), donde la mezcla se mantuvo turbia aún después de finalizado el mismo.

Método Experimental

Los materiales a ensayar se extrajeron de cilindros sellados y almacenados en los ambientes del Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

En cada caso, el material se encontró en estado pastoso y cubierto de agua, resultado de la sedimentación del material. El material fue retirado y secado en el horno, a una temperatura de 150° , obteniéndose un material endurecido que debió ser molido antes de su uso.



**Figura 3.6: Material endurecido, antes de la molienda. Muestra N°1 –
Compañía Minera Cobriza.**

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.7: Material molido. Muestra N°1 – Compañía Minera Cobriza.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez molido el material, se obtiene una muestra para el ensayo granulométrico del Hidrómetro, y para la estimación de la gravedad específica con el picnómetro. Con el fin de obtener resultados más confiables, se realizaron cuatro ensayos para cada una de las muestras en estudio; los resultados se comentan en el ítem anterior (Cuadros 3.2 y 3.3).

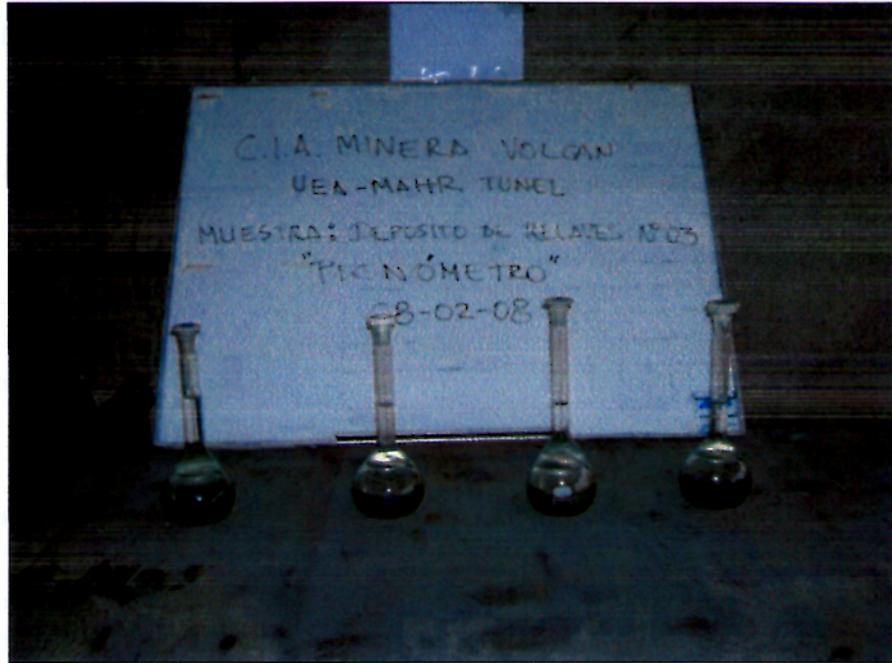


Figura 3.8: Ensayo del Picnómetro. Muestra N°2-Minera Volcan.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que se requieren 40 litros de mezcla para los ensayos reométricos, se elaboró una tabla con las posibles concentraciones a estudiar y las cantidades de material seco y de agua que eran necesarias para obtener dichas concentraciones. Esta tabla permite optimizar el uso del material y prever la posible falta del mismo durante los ensayos.

Asimismo, como metodología de ensayo se decidió empezar los ensayos con la concentración más alta posible; de esta manera, las siguientes concentraciones se obtendrían retirando parte de la mezcla original y luego agregando agua. Estas estimaciones se incluyen en las siguientes tablas.

**Cuadro N°3.4: Volúmenes requeridos para testeo experimental. Muestra N°1 –
Compañía Minera Cobriza.**

Gravedad Específica - Relave 3.65 Kg/lt
Gravedad Específica - Agua 1 Kg/lt
Volumen de ensayo 40 litros

Concentración peso (%)	Relave		Agua		Mezcla		% Concentr. volumétrica	Obtención de nueva mezcla		
	Peso (Kg)	Volumen (lt)	Peso (Kg)	Volumen (lt)	Peso (Kg)	Volumen (lt)		Mezcla a quitar		Agua a agregar para nueva mezcla (lt)
								Peso (Kg)	Volumen (lt)	
80	76.34	20.92	19.08	19.08	95.42	40.00	52.29			
75	65.86	18.05	21.95	21.95	87.82	40.00	45.11	13.09	5.49	5.49
70	56.94	15.60	24.40	24.40	81.34	40.00	39.00	11.90	5.42	5.42
65	49.23	13.49	26.51	26.51	75.75	40.00	33.72	11.00	5.41	5.41
60	42.52	11.65	28.35	28.35	70.87	40.00	29.13	10.32	5.45	5.45
55	36.62	10.03	29.97	29.97	66.59	40.00	25.09	9.83	5.55	5.55

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro N°3.5: Volúmenes requeridos para testeo experimental. Muestra N°2 -
Compañía Minera Volcan.**

Gravedad Específica - Relave 2.89 Kg/lt
Gravedad Específica - Agua 1 Kg/lt
Volumen de ensayo 40 litros

Concentración peso (%)	Relave		Agua		Mezcla		% Concentr. volumétrica	Obtención de nueva mezcla		
	Peso (Kg)	Volumen (lt)	Peso (Kg)	Volumen (lt)	Peso (Kg)	Volumen (lt)		Mezcla a quitar		Agua a agregar para nueva mezcla (lt)
								Peso (Kg)	Volumen (lt)	
80	67.11	23.22	16.78	16.78	83.89	40.00	58.06			
75	58.88	20.37	19.63	19.63	78.51	40.00	50.93	10.29	4.91	4.91
70	51.64	17.87	22.13	22.13	73.77	40.00	44.67	9.65	4.92	4.92
65	45.22	15.65	24.35	24.35	69.58	40.00	39.12	9.17	4.97	4.97
60	39.50	13.67	26.33	26.33	65.83	40.00	34.17	8.81	5.06	5.06
55	34.36	11.89	28.11	28.11	62.47	40.00	29.72	8.57	5.21	5.21

Fuente: Elaboración propia.

Definidas las concentraciones, y con la certeza de contar con la materia prima suficiente, se procedió a realizar los ensayos, empezando con la mezcla de mayor concentración; de esta manera, solamente fue necesario incrementar el agua requerida para obtener las mezclas menos concentradas. Con el fin de facilitar la mezcla de los materiales, se hizo uso de un tambor de operación manual.



**Figura 3.9: Mezcla del relave con agua. Muestra N°1 – Compañía Minera
Cobriza.**

Fuente: Elaboración propia.

Para cada una de las concentraciones en estudio se realizaron 5 ensayos de asentamiento con el fin de obtener un valor promedio; paralelamente, se utilizó un reómetro de caída de varilla para medir en forma directa el valor del esfuerzo de cedencia para cada concentración en estudio.



Figura 3.10: Reómetro de caída de varilla. Muestra N°1 – Compañía Minera Cobriza.

Fuente: Elaboración propia.

Finalizados los ensayos correspondientes, se tomó una muestra para calcular el contenido de humedad, la concentración de sólidos y la densidad. Para preservar sus características, las muestras fueron almacenadas en recipientes plásticos con tapa, y se marcó el nivel alcanzado por el material utilizando un plumón indeleble. Asimismo, para evitar confusiones y errores humanos, se etiquetó cada uno de los recipientes.

En total, se tomaron 7 muestras correspondientes a las 7 concentraciones estudiadas del relave de la Compañía Minera Cobriza, y 5 muestras correspondientes a las 5 concentraciones estudiadas de la Compañía Minera Volcan.



Figura 3.11: Muestras tomadas para caracterización física. Muestra N°2 – Compañía Minera Volcan.

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro N°3.6 se indican los métodos y equipos utilizados para la caracterización de las mezclas estudiadas.

Cuadro N°3.6: Metodología e Instrumentación para la caracterización del relave

Propiedad	Método	Instrumento
Densidad (material seco)	Picnometría simple	Picnómetro simple
Granulometría	Hidrómetro	Hidrómetro
Consistencia	Ensayo de asentamiento	Cilindro de asentamiento
Esfuerzo de cedencia	Reómetro de caída de varilla	Máquina de Atwood
Contenido de humedad	Estándar	Platillo, horno y balanza
Densidad (mezcla)	Directo	Biker y balanza

En el Anexo A-2 se presentan las tablas resumen con los resultados.

Descripción del Ensayo

Para el llenado del cilindro con la muestra a ensayar, se tomó como base de procedimiento la norma ASTM-C143 – C143M – 00, la cual describe el Método de la Prueba Standard para el Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico. La norma mencionada estandariza la prueba para un cono metálico de 30cm de altura, pero ha sido adaptada en sus reglas generales a nuestro ensayo.

Según esta norma, el tiempo de llenado del molde debe ser un máximo de 30 segundos y la temperatura ambiente debe ser registrada como referencia. El llenado se hace en 3 capas, cada una de 10cm, debiendo realizarse el correspondiente chuzado con una varilla lisa de acero antes de llenar la siguiente capa en una cantidad de 25 golpes distribuidos uniformemente en toda la sección. Una vez lleno el molde, la mezcla se enrasa con la varilla de acero, y se procede al retiro del molde, registrándose la diferencia entre la altura del molde y la altura del material (h). Todo el proceso del ensayo, desde el llenado hasta la medición no debe demorar más de 2,5 minutos.

A pesar que la norma nos permite llenar el molde en capas de 10cm, para el presente estudio se adoptará el llenado en dos capas con el correspondiente chuzado de 25 golpes. Bajo ningún caso las capas deben ser mayores a 7cm, para garantizar la uniformidad del material. Todas las demás características mencionadas se mantienen.

La norma limita la validez en la aplicación del ensayo solamente a mezclas cuyo asentamiento sea inferior a 25cm, es decir, un asentamiento inferior al 83.3% de la altura del molde. Para nuestro caso se ha considerado que este porcentaje se mantiene para la geometría cilíndrica adoptada; esto implica que el asentamiento debe ser menor a 8,3cm, sin embargo se trabajará con todas las mezclas posibles para analizar la validez o no de esta regla.

Asimismo, con el fin de establecer una mejor relación entre las variables en estudio, además de la medida del asentamiento, se realizará la medición del radio de esparcimiento horizontal.

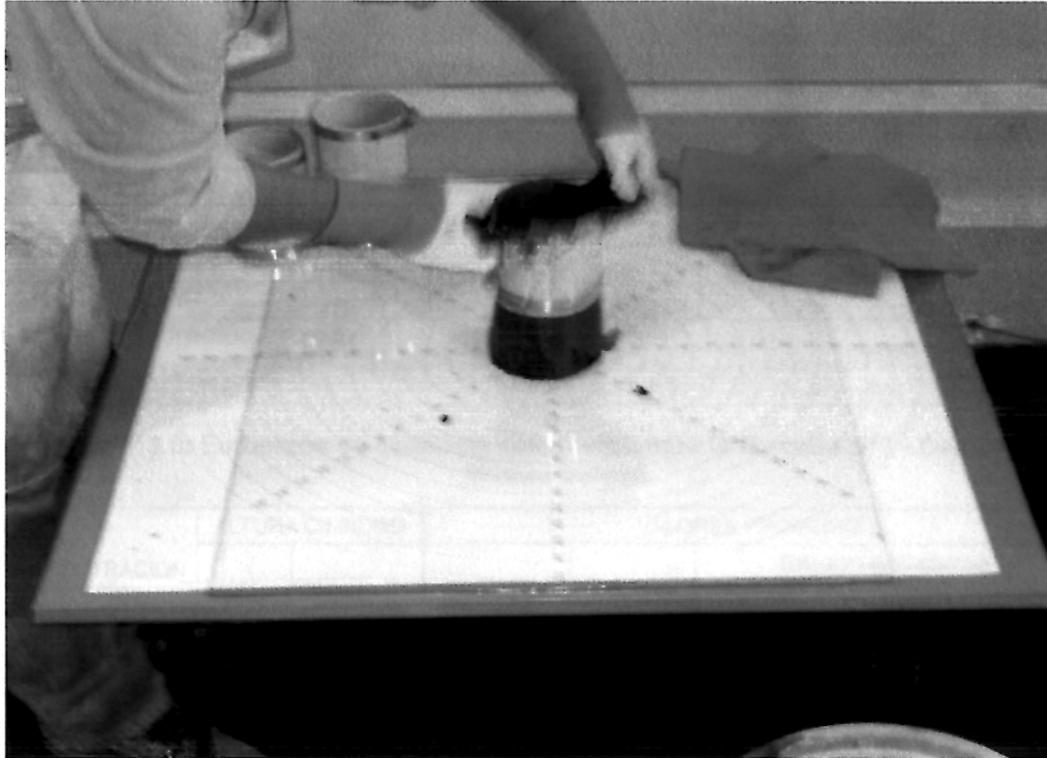


Figura 3.12: Procedimiento de la prueba de asentamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Todos los ensayos se realizaron sobre una mesa de ensayo de 80cm x 80cm, con patas nivelantes para asegurar la horizontalidad, mientras que su plataforma fue recubierta de vidrio para obtener una superficie lisa. Entre la plataforma y el vidrio se colocó una lámina de coordenadas radiales con el fin de facilitar la lectura del esparcimiento horizontal.

3.4. CALIBRACIÓN

Con los datos obtenidos, asentamiento, radio de esparcimiento horizontal, densidad, altura de cilindro y gravedad, se procedió a estimar el valor del esfuerzo de cedencia utilizando la expresión de Coussot (ecuación 2.4), la expresión de Boger (ecuación 2.2) y su expresión corregida por Coussot (ecuación 2.5). Los resultados obtenidos para cada muestra en estudio son:

Cuadro N°3.7: Esfuerzos de cedencia calculados para la Muestra N°1 - Compañía Minera Cobriza

CONCENTRACIÓN (%PESO)	ALTURA CILINDRO		VALORES PROMEDIO				
	pulg	cm	Asentamiento (cm)	Densidad (g/cm ³)	Esfuerzo de Cedencia		
					Ec.Coussot (dyn/cm ²)	Ec.Boger (dyn/cm ²)	Ec.Boger-Coussot (dyn/cm ²)
79.01%	4	10.16	3.3	2.31	8308.15	3579.63	4138.31
77.51%	4	10.16	6	2.28	1827.60	1553.00	1725.37
76.91%	4	10.16	7.24	2.25	770.42	918.30	1061.62
74.50%	4	10.16	8.2	2.15	194.04	509.90	589.48
74.41%	4	10.16	8.52	2.16	129.75	405.12	428.37
70.87%	4	10.16	8.74	2.01	84.57	312.75	361.57
67.54%	4	10.16	9.48	1.94	13.75	119.75	138.44

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°3.8: Esfuerzos de cedencia calculados para la Muestra N°2 - Compañía Minera Volcan

CONCENTRACION (%PESO)	ALTURA CILINDRO		VALORES PROMEDIO				
	pulg	cm	asentamiento (cm)	Densidad (g/cm ³)	Esfuerzo de Cedencia		
					Ec.Coussot (dyn/cm ²)	Ec.Boger (dyn/cm ²)	Ec.Boger-Coussot (dyn/cm ²)
55.45%	4	10.16	5.46	1.55	1840.39	1272.25	1469.06
53.25%	4	10.16	7.48	1.48	424.79	536.12	619.05
51.75%	4	10.16	7.98	1.45	236.37	396.43	457.76
51.22%	4	10.16	8.34	1.42	154.32	305.31	352.54
50.35%	4	10.16	8.86	1.41	67.37	195.88	226.18

Fuente: Elaboración propia.

Paralelamente, se realizó la medición directa del esfuerzo de cedencia para cada muestra y para cada concentración, siendo los resultados los mostrados en los Cuadros N°3.9 y N°3.10.

Cuadro N°3.9: Esfuerzo de cedencia medido, Muestra N°1 - Compañía Minera Cobriza

	CONCENTRACIÓN (%PESO)	ESFUERZO DE CEDENCIA (dyn/cm ²)
1	79.01%	7450.00
2	77.51%	2586.67
3	76.91%	616.67
4	74.50%	220.67
5	74.41%	138.50
6	70.87%	78.75
7	67.54%	7.25

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°3.10: Esfuerzo de cedencia medido, Muestra N°2 - Compañía Minera Volcan

	CONCENTRACIÓN (%PESO)	ESFUERZO DE CEDENCIA (dyn/cm2)
1	55.45%	1380.00
2	53.25%	372.00
3	51.75%	201.00
4	51.22%	99.00
5	50.35%	59.00

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Ecuaciones existentes

a) Análisis de Resultados

La contrastación de los esfuerzos de cedencia calculados con cada una de las expresiones mostradas y la medida obtenidas por reometría se muestran a continuación.

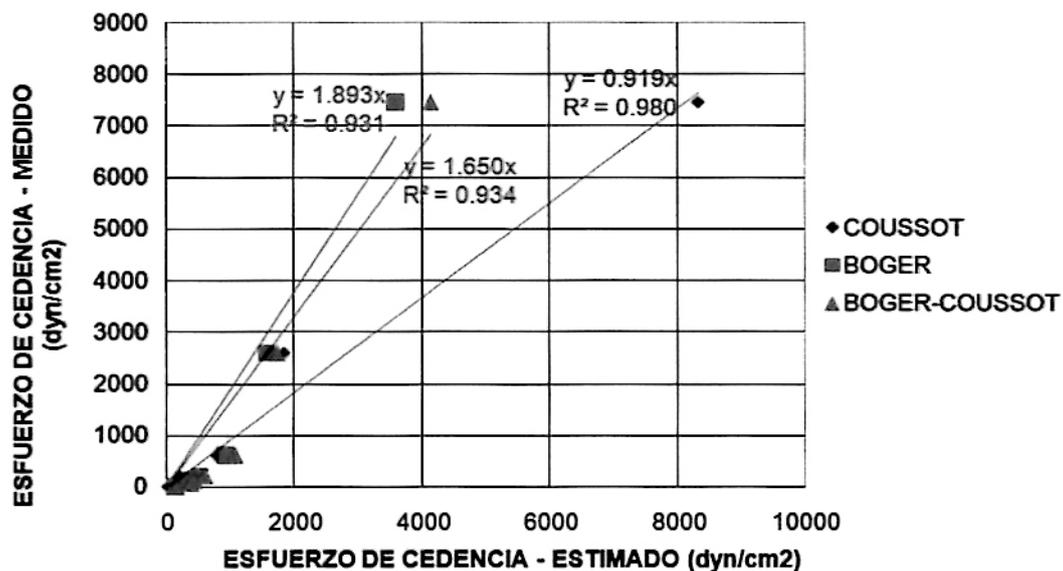


Figura 3.13: Esfuerzo de Cedencia Medido vs. Esfuerzo de Cedencia Estimado. Muestra N°1 – Compañía Minera Cobriza. Análisis Lineal.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico, los resultados obtenidos con la Ecuación de Coussot arrojan una línea de tendencia cercana en un 8% a la función identidad y una correlación de 0.98, muy superior a las otras dos ecuaciones en estudio. En efecto, la dispersión que muestran las otras dos ecuaciones en estudio es

superior al 100% respecto a los datos de medición directa correspondientes a esfuerzos de cedencia inferiores a 1000 dynas/cm².

Analicemos ahora los resultados de la Muestra N°2.

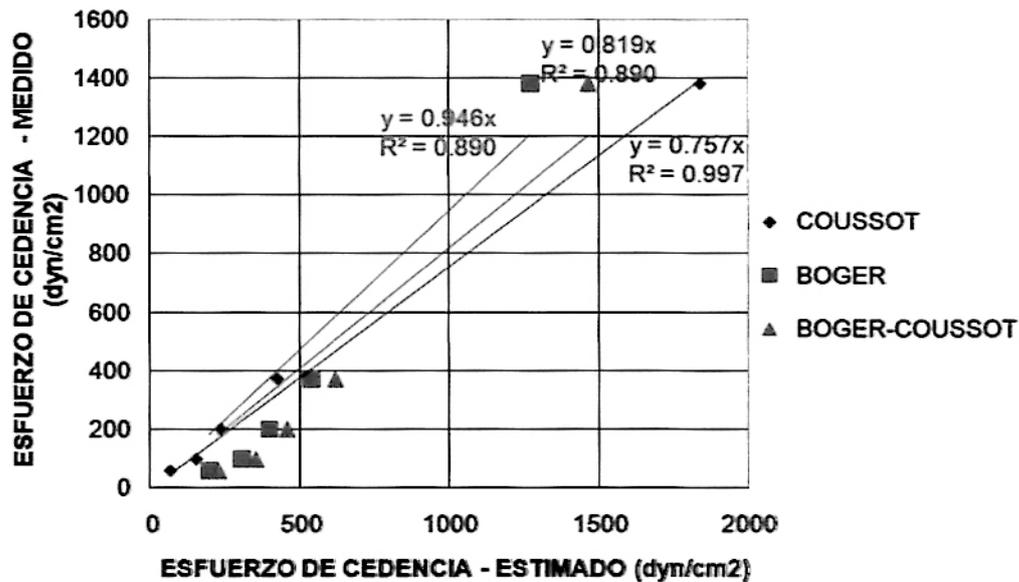


Figura 3.14: Esfuerzo de Cedencia Medido vs. Esfuerzo de Cedencia Estimado. Muestra N°2 – Compañía Minera Volcan. Análisis Lineal.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, en la Muestra N°2, los resultados obtenidos con la Ecuación de Coussot brindan la mejor correlación y el gráfico se ajusta mejor a los datos, muy diferente a los resultados de las otras dos ecuaciones, que se acercan más a la función identidad pero presentan una mayor dispersión de datos, llegando a ser superior al 100% para valores menores a 500 dynas/cm².

A pesar que los gráficos y las regresiones desarrolladas muestran concordancia respecto a los datos medidos, el último dato de cada una de las muestras se muestra alejado de los demás, configurando una posible "correlación espuria"; por ese motivo, se procedió a eliminar dichos datos y a realizar un nuevo análisis de correlación. Los nuevos gráficos encontrados se muestran a continuación.

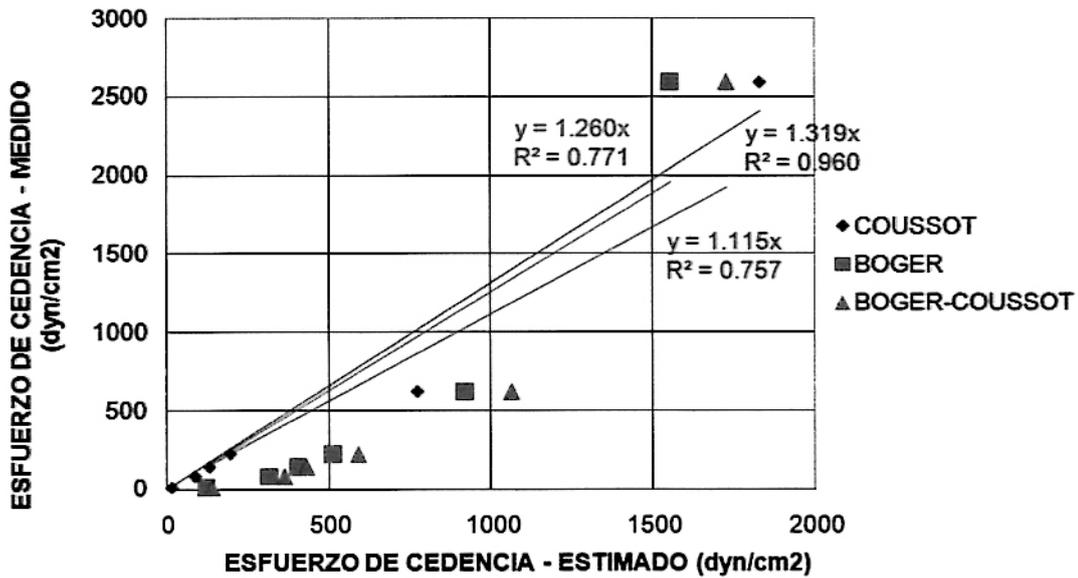


Figura 3.15: Esfuerzo de Cedencia Medido vs. Esfuerzo de Cedencia Estimado. Muestra N°1 Depurada – Compañía Minera Cobriza. Análisis Lineal.

Fuente: Elaboración propia.

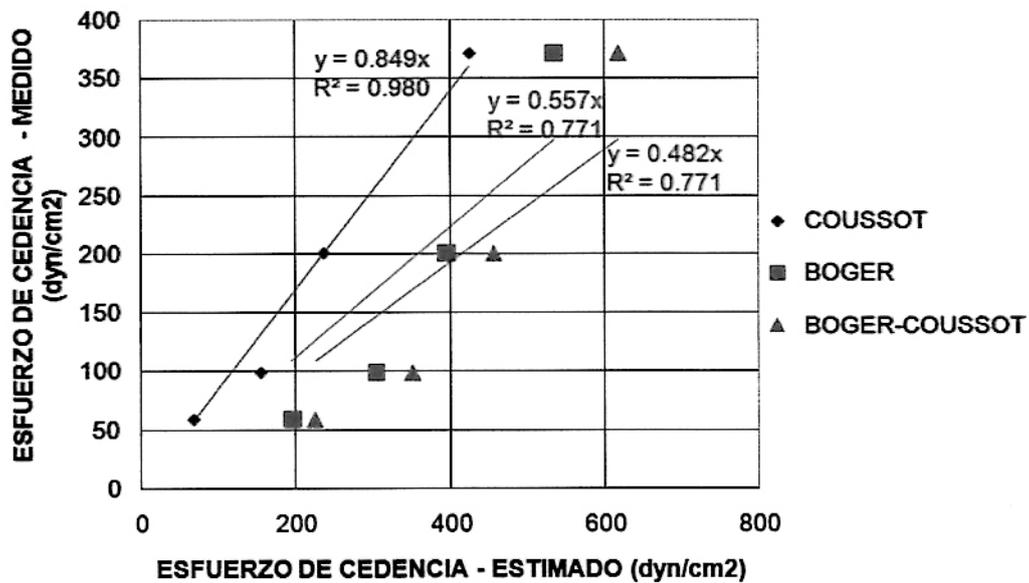


Figura 3.16: Esfuerzo de Cedencia Medido vs. Esfuerzo de Cedencia Estimado. Muestra N°2 Depurada – Compañía Minera Volcan. Análisis Lineal.

Fuente: Elaboración propia.

Los nuevos análisis ratifican el predominio de la Ecuación de Coussot respecto a las otras ecuaciones en análisis, con una correlación superior a 0.96 y 0.98 respectivamente. El análisis visual confirma la representatividad de las ecuaciones encontradas y la alta correlación.

Asimismo, como puede observarse en las Figuras 3.15 y 3.16, las ecuaciones encontradas para la expresión de Coussot presentan coeficientes que oscilan alrededor de la unidad, a pesar de la diferencia entre los pesos específicos de las muestras en estudio. Esta eventualidad será superada asumiendo un coeficiente promedio.

Es importante resaltar que el análisis realizado es solamente lineal; sin embargo, es innegable notar que los gráficos correspondientes a los esfuerzos de cedencia estimados con las Ecuaciones de Boger y de Boger-Coussot vs. los esfuerzos de cedencia medidos con el reómetro presentan una forma parabólica, como se muestra a continuación.

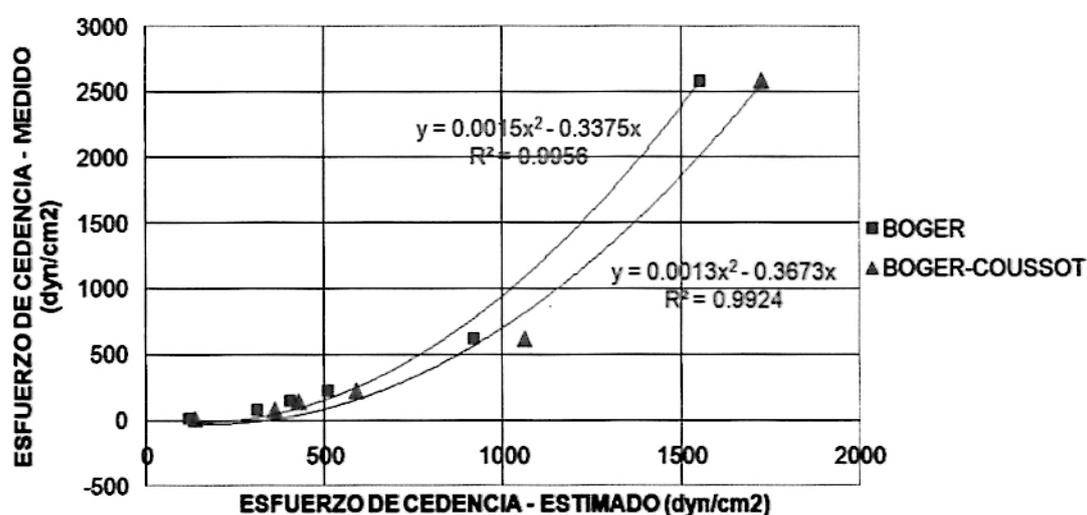


Figura 3.17: Esfuerzo de Cedencia Medido vs. Esfuerzo de Cedencia Estimado. Muestra N°1 Depurada – Compañía Minera Cobriza. Análisis Cuadrático.

Fuente: Elaboración propia.

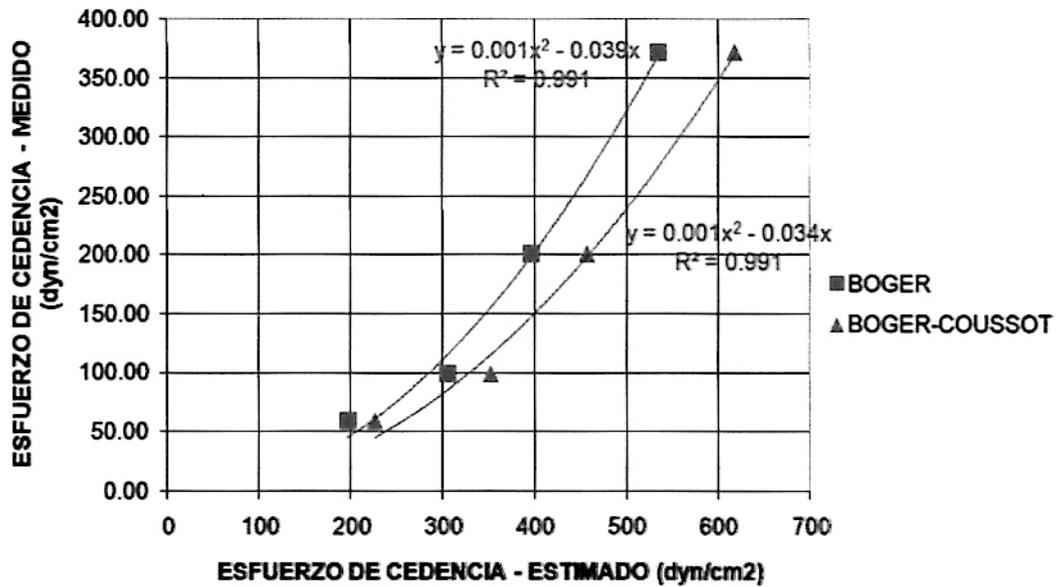


Figura 3.18: Esfuerzo de Cedencia Medido vs. Esfuerzo de Cedencia Estimado. Muestra N°2 Depurada – Compañía Minera Volcan. Análisis Cuadrático.

Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 3.17 y 3.18, muestran que las ecuaciones encontradas para la expresión de Boger presentan coeficientes similares; similar situación se observa con las ecuaciones correspondientes a la expresión de Boger-Coussot, demostrando que estas dos ecuaciones son más estables y no se ven afectadas por la variación de pesos específicos entre una muestra y otra.

b) Ajuste Empírico

Para un análisis lineal, la Ecuación de Coussot es la que presenta un mejor ajuste a los datos reométricos para cualquiera de las muestras ensayadas, debido a que la expresión planteada considera tanto la variación vertical como la variación horizontal de la muestra. Por lo tanto, podemos afirmar que:

$$\tau_{y-real} = a\tau_{y-coussot} \quad (3.5)$$

donde "a" es un factor de corrección adimensional.

Para encontrar un valor promedio de "a", se promedian los coeficientes de las ecuaciones de regresión correspondientes a la expresión de Coussot para cada una de las muestras, las cuales se encuentran en los gráficos 3.15 y 3.16. De esta manera se obtiene que el valor promedio de $a=1.084$, y se plantea la siguiente ecuación general:

$$\tau_{y-real} = 1.084\tau_{y-coussot} \quad (3.6)$$

Para un análisis cuadrático de los esfuerzos de cedencia medidos con el reómetro vs. los esfuerzos de cedencia estimados con las Ecuaciones de Boger y de Boger-Coussot, se encontró una correlación superior a 0.99, como se puede apreciar en las Figuras 3.17 y 3.18.

De estos resultados, podemos afirmar que el "esfuerzo de cedencia real" (τ_{real}) y el "esfuerzo de cedencia calculado con la expresión de Boger" (τ_{boger}) presentan la siguiente relación:

$$\tau_{y-real} = a\tau_{y-boger}^2 + b\tau_{y-boger} \quad (3.7)$$

donde "a" tiene dimensiones $M^{-1}LT^2$, y "b" es adimensional.

Para encontrar el valor de los coeficientes "a" y "b", procedemos de forma similar a lo realizado con la ecuación de Coussot: promediamos los coeficientes de las ecuaciones de regresión correspondientes a la expresión de Boger para cada una de las muestras, las cuales se encuentran en los gráficos 3.17 y 3.18. Así,

podemos hablar de un valor promedio de $a=0.00125\text{cm}^2/\text{dyn}$ y $b=-0.18825$; es decir

$$\tau_{y\text{-real}} = 0.00125\tau_{y\text{-bogor}}^2 - 0.18825\tau_{y\text{-bogor}} \quad (3.8)$$

En forma similar, para la ecuación de Boger-Coussot, los valores promedio de los coeficientes son $a=0.00115\text{cm}^2/\text{dyn}$ y $b=-0.20065$; es decir

$$\tau_{y\text{-real}} = 0.00115\tau_{y\text{-bogor-coussot}}^2 - 0.20065\tau_{y\text{-bogor-coussot}} \quad (3.9)$$

3.4.2. Relación Empírica

a) Análisis de Resultados

En el análisis teórico se plantearon las ecuaciones (3.3) y (3.4) como posibles relaciones entre el asentamiento y el esfuerzo de cedencia, para un cilindro de 4" de altura. Para seleccionar la más adecuada, graficamos el esfuerzo de cedencia medido por reometría (τ_y) vs. asentamiento (s).

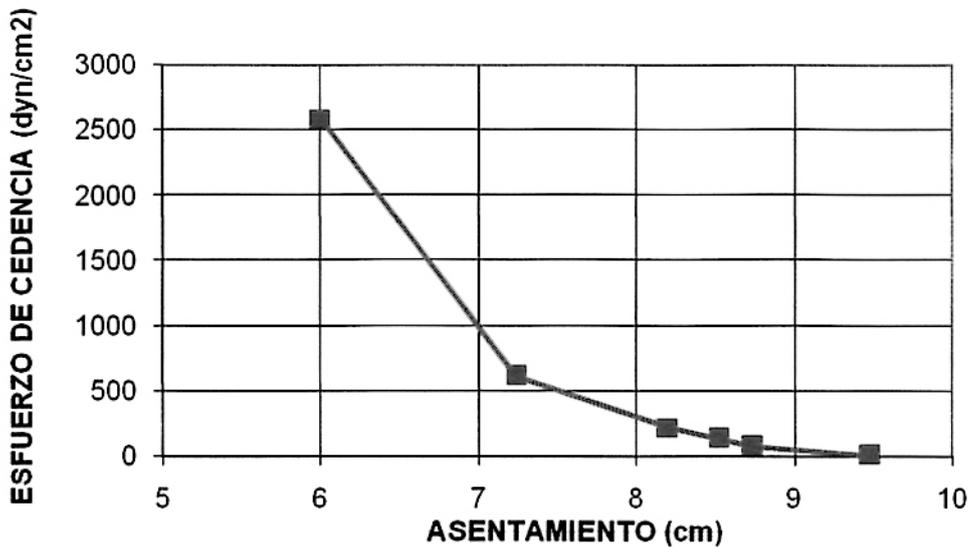


Figura 3.19: Esfuerzos de Cedencia medidos por reometría vs. Asentamiento. Muestra N°1 Depurada – Compañía Minera Cobriza.

Fuente: Elaboración propia.

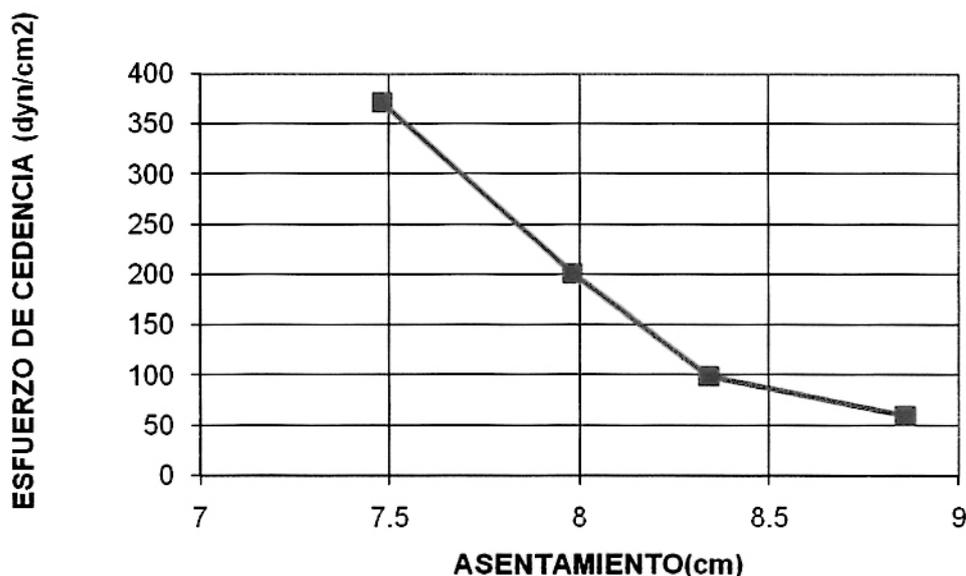


Figura 3.20: Esfuerzos de Cedencia medidos por reometría vs. Asentamiento. Muestra N°2 Depurada – Compañía Minera Volcan.
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos sugieren que la relación entre ambas variables es cuadrática y, por tanto, la ecuación más adecuada es la (3.4).

b) Ajuste Empírico

Como se mostró en la Ecuación (3.4), el esfuerzo de cedencia es directamente proporcional a $\rho g(h-s)^2$, para cilindros de muestra de 4" de diámetro. Habiendo medido este esfuerzo crítico con el reómetro de caída de cilindro y conociendo la densidad y el asentamiento para cada una de las concentraciones de muestra ensayadas, podemos hacer un análisis de regresión lineal para hallar el valor del coeficiente k^* .

Con este fin, calculamos el valor de $\rho g(h-s)^2$ para cada una de las concentraciones de cada muestra.

Cuadro N°3.11: Valores de $\rho g(h - s)^2$. Muestra N°1 Depurada – Compañía Minera Cobriza.

%PESO	ALTURA CILINDRO (h)		PROMEDIOS		
	pulg	cm	asentamiento (cm)	Densidad (g/cm ³)	$\rho g(h-s)^2$ (dyn/cm)
77.51%	4	10.16	6	2.28	35686.92
76.91%	4	10.16	7.24	2.25	16766.99
74.50%	4	10.16	8.2	2.15	6814.56
74.41%	4	10.16	8.52	2.16	4628.41
70.87%	4	10.16	8.74	2.01	3121.70
67.54%	4	10.16	9.48	1.94	513.17

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°3.12: Valores de $\rho g(h - s)^2$. Muestra N°2 Depurada – Compañía Minera Volcan.

%PESO	ALTURA CILINDRO (h)		PROMEDIOS		
	pulg	cm	asentamiento (cm)	Densidad (g/cm ³)	$\rho g(h-s)^2$ (dyn/cm)
53.25%	4	10.16	7.48	1.48	9194.27
51.75%	4	10.16	7.98	1.45	5787.95
51.22%	4	10.16	8.34	1.42	3827.88
50.35%	4	10.16	8.86	1.41	1792.60

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos 3.21 y 3.22 muestran la relación entre el esfuerzo de cedencia medidos y $\rho g(h - s)^2$, correspondientes al uso de cilindros de 4" de altura.

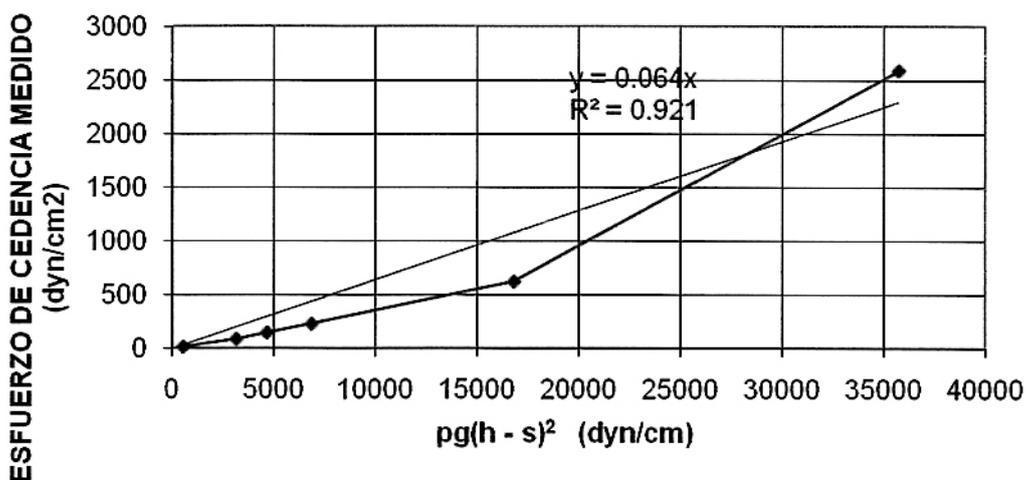


Figura 3.21: Esfuerzos de Cedencia medidos vs. $\rho g(h - s)^2$. Muestra N°1 Depurada – Compañía Minera Cobriza.

Fuente: Elaboración propia.

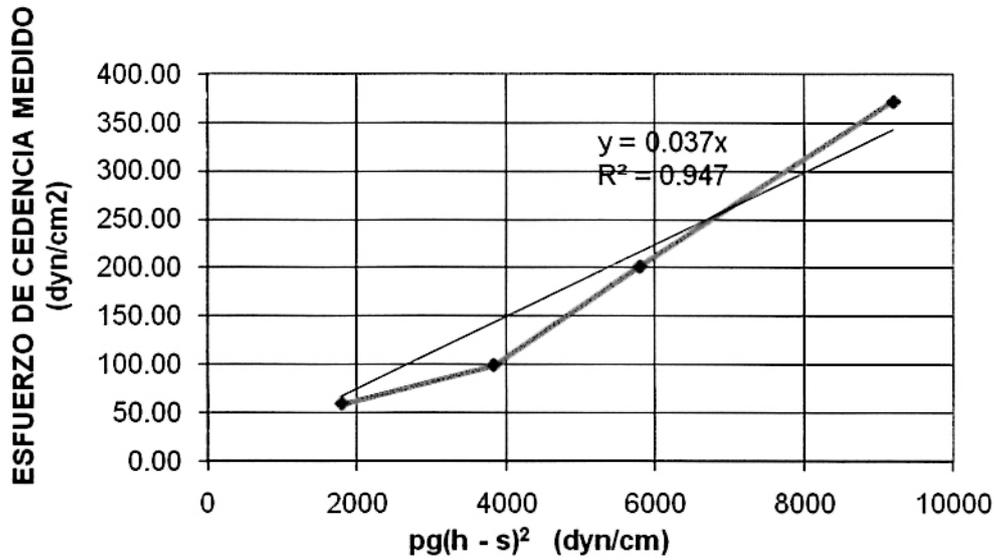


Figura 3.22: Esfuerzos de Cedencia medidos vs. $\rho g(h - s)^2$. Muestra N°2 Depurada – Compañía Minera Volcan.

Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos muestran una correlación superior al 90%, por lo cual se puede afirmar que la proporcionalidad asumida es correcta, y que el valor de k^* es de 0.064 para la Muestra N°1, y es de 0.037 para la muestra N°2. Al promediar estos dos valores, se encuentra un valor promedio de k^* . Por tanto, se plantea la siguiente expresión:

$$\tau_y = 0.0505 \rho g (10.16 - s)^2 \quad (3.10)$$

donde 0,0505 es el promedio de los coeficientes hallados.

CONCLUSIONES

Analizados los datos, para relaves con concentraciones de sólidos entre 77% y 50%, se puede concluir lo siguiente:

1. Los asentamientos obtenidos para cilindros de ensayo de igual altura pero distinto diámetro tienden a ser aproximadamente iguales para concentraciones en peso menores a 75%. Para concentraciones mayores, el asentamiento es menor a mayor diámetro del cilindro de ensayo debido a que el contacto con la superficie se incrementa y por tanto la fricción.
2. Los asentamientos obtenidos para cilindros de igual diámetro pero diferente altura varía debido a la variación de la carga estática. Esta variación no afecta la estimación del esfuerzo de cedencia pues éste es una propiedad intrínseca del fluido, y solamente trascenderá en fluidos de elevado esfuerzo de cedencia pues facilitará la medición del asentamiento.
3. Las cuatro ecuaciones estudiadas muestran correlaciones superiores al 90%; sin embargo, solamente la de Coussot presenta un buen ajuste gráfico entre esfuerzos de cedencia medidos y esfuerzos de cedencia calculados.
4. El uso de la ecuación de Boger requiere de una calibración previa a una curva cuadrática, de lo contrario los errores pueden llegar a superar el 100% para concentraciones de sólidos menores a 70%.
5. La ecuación propuesta en la presente investigación, para concentraciones en peso en el rango de 50% a 77%, utilizando cilindros de ensayo de cuatro pulgadas de diámetro (4") y cuatro pulgadas de altura (4") queda definida por la ecuación 3.10:

$$\tau_y = 0.0505 \rho g (10.16 - s)^2$$

RECOMENDACIONES

1. Debido a que en el país no se han realizado investigaciones relacionadas al tema, se recomienda ampliar la investigación en los siguientes aspectos:
 - Influencia de la geometría, troncocónica y cilíndrica, sobre el asentamiento final.
 - Relación entre el asentamiento y el ph.
 - Relación entre la granulometría de la mezcla y el asentamiento.
 - Aplicación de la metodología al estudio de flujos de lodos y de escombros.
2. Asimismo, todos los ajustes y ecuaciones encontradas deben ser validadas realizando los mismos ensayos con un número mayor de muestras de relaves de diferentes minas y de diferentes características.
3. Se recomienda realizar ensayos similares con mayor cantidad de concentraciones, buscando verificar o descartar un mayor rango de validez de la ecuación de Coussot, especialmente para concentraciones de sólidos de hasta 80% en peso, y para muestras de diferente peso específico.
4. La aplicación del método puede extenderse a todo tipo de mezclas sólido-líquido, con concentraciones en peso superiores a 50%, especialmente a aquellas que presentan una granulometría muy grande, la cual impide el uso de reómetros convencionales, como son lodos, escombros.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Ancey, Christophe.** Notebook: Introduction to Fluid Rheology. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne - Suiza. 2005.
2. **Bird, R.Byron; Stewart, Warren E.; Lightfoot, Edwin N.** Fenómenos de Transporte. Ed. Reverté S.A. México D.F. 1997.
3. **Blasco Alberto, Javier.** Apuntes del Curso de Reología Aplicada. Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza. España. 2006.
4. **Davidson, Malcom R.; Hasan Khan, N.; Leong Yeow, Y.** Collapse of a cylinder of Bingham fluid - Australian & New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal N°42 (E). Pg C499 – C517. ANZIAM. Canberra – Australia. 2000
5. **De Araujo, Armando; Vadalao, George E. S.; Da Gama, Evandro M. y Hernández, Christian A.** Consistencia, Fluidez y Viscosidad de Pastas Minerales de Relaves de Hierro. Información Tecnológica-Vol. 17 N°2-2006, pág.: 71-79. La Serena - Chile 2006.
6. **De Notta, Hugo.** Introducción a la Reología. Artículo Técnico. Sociedad Argentina de Tecnólogos en Recubrimientos. Buenos Aires. Argentina. 2005.
7. **Ferraris, Chiara F.; De Larrard, François.** Testing and modelling of fresh concrete rheology. United States Department of Commerce – Technology Administration – National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, Maryland – U.S.A. 1998.
8. **Garza Garza, Salvador.** Caracterización reológica y microbiológica, y cinéticas de deterioro en cremogenado de melocotón. Server de Publicacions - Universitat de Lleida. Lleida, Catalunya - España 1998.

9. **Julien, Pierre Y.; Yongqian Lan.** Rheology of Hyperconcentrations. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 3, March 1991, pp. 346-353. American Society of Civil Engineers (ASCE). Washington – U.S.A. 1991.
10. **Ministerio de Energía y Minas.** Guía Ambiental Para el manejo de Relaves. Lima – Perú. 2007.
11. **Moreno Botella, Rodrigo.** Curso de Introducción a la Reología - Principios Básicos de Reología. Instituto de Cerámica y vidrio, CSIC. Madrid - España 2003.
12. **Rodríguez, Roberto y Oldecop, Luciano.** Propiedades físicas, mecánicas e hidrogeológicas de los residuos minero-metalúrgicos sólidos. Tesis en elaboración. Maestría ALFA. Madrid-España. 2007.
13. **Schramm, Gebhard.** A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Gebrueder HAAKE GmbH. 2da.Edición. Alemania 2000.
14. **Steffe, James F.** Rheological Methods in Food Process Engineering. Freeman Press. 2da.Edición. Michigan – U.S.A. 2005.
15. **Wang Yuyi; Chen Rui.** A modified rheological model of natural debris flows. CHINESE SCIENCE BULLETIN Vol.45 No.8 P.743-748. Chengdu - China 2000.