



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESCARGA PUNTUAL DE UNA PASTA DE
RELAVES SOBRE UN PLANO INCLINADO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

FABIAN ANDRES VALENZUELA PRATT

PROFESOR GUIA:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

MIEMBROS DE LA COMISION:
CHRISTIAN IHLE BASCUÑAN
NARA ALTMANN

SANTIAGO DE CHILE
2011

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: FABIAN VALENZUELA P.
PROF. GUIA: Sr. ALDO TAMBURRINO T.

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DESCARGA PUNTUAL DE UNA PASTA DE RELAVES SOBRE UN PLANO INCLINADO”

La minería es una de las actividades económicas más importantes de nuestro país. Las pastas de relaves son los principales desechos generados por las faenas mineras, y su disposición suele ser un problema complejo para esta industria. En general, estas pastas tienen un comportamiento reológico no-Newtoniano, tipo plástico de Bingham.

Esta memoria de título aborda el problema del comportamiento hidráulico de las pastas de relaves al fluir sobre una superficie inclinada. Las pastas son representadas por mezclas de bentonita con agua, las que se comportan como un plástico de Bingham. Se experimentó con una descarga puntual sobre un plano inclinado, en una instalación experimental especialmente diseñada para este estudio, ubicada en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil.

Previo a los experimentos, los lodos bentoníticos fueron caracterizados reológicamente, en ensayos realizados en las dependencias de la empresa Brass Chile S.A., determinándose sus parámetros reológicos, en función de la concentración de bentonita.

Los experimentos cubrieron cinco concentraciones de bentonita, cuatro pendientes del plano, y cuatro caudales, sumando alrededor de ochenta experiencias, registrándose perfiles longitudinales y transversales de altura, y el ancho máximo alcanzado por el escurrimiento. Los perfiles fueron determinados a partir de la variación que presenta la intersección de un plano de iluminación láser con la superficie libre, respecto al fondo.

El procesamiento y posterior análisis de los resultados permitió identificar las leyes de resistencia del flujo, tanto para la condición estable como con la presencia de ondas rodantes, resultando en una relación entre el número de Froude y el número de Reynolds, este último caracterizado a partir de una viscosidad equivalente, la que incorpora el esfuerzo de fluencia y el coeficiente de consistencia. Se encontró que la condición de inestabilidad está bien representada por el criterio de Coussot. También se determinó que el ancho máximo alcanzado por el flujo escala con la altura máxima de la sección.

Agradecimientos

A mis padres Erika y Luis, por todo el amor incondicional que siempre me han dado, por inculcarme los valores que me hacen ser el hombre que soy, y por apoyarme durante todos estos años de estudio.

A mi hermana Daniela, por confiar en mí, y por entregarme todo su cariño y apoyo.

A mi hermana Danae, por creer en que lograría mis metas.

A mis abuelos Elsa y Jorge, por enseñarme que la vida es hermosa.

A mis abuelos Edita y Luis, por recibirme siempre con sus brazos abiertos.

A mis amigos por darme tantos momentos de alegrías, por tantos fines de semanas mágicos, y por ayudarme a superar los momentos más difíciles.

A mis compañeros de universidad por sus palabras de ánimo, su ayuda académica, y por tantos buenos momentos vividos.

A mi tía Mónica, por acogerme con cariño en su casa durante este último tiempo.

Y a mi profesor Aldo T., por su comprensión, paciencia y apoyo a lo largo de todo el desarrollo de mi trabajo de título.

Índice de Capítulos

1.	Introducción	1
2.	Objetivos	3
2.1.	Objetivos Generales	3
2.2.	Objetivos Específicos.....	3
3.	Instalación Experimental.....	4
3.1.	Partes de la Instalación.....	4
3.2.	Dispositivos de Medición.....	5
4.	Metodología	8
4.1.	Actividades Previas	8
4.2.	Metodología de Experimentación y Análisis	8
4.3.	Fórmulas para la Medición de la Altura de Esguerrimiento	10
5.	Revisión Bibliográfica y Marco Teórico	13
5.1.	Revisión Bibliográfica	13
5.2.	Marco Teórico.....	16
5.2.1.	Distribución de Velocidades	16
5.2.2.	Equilibrio en una Sección Transversal.....	19
6.	Caracterización Reológica de los Lodos.....	21
6.1.	Instalación Experimental.....	21
6.2.	Metodología	22
6.3.	Resultados	24
6.4.	Utilidad de los Lodos Bentoníticos para Simular Pastas de Relaves.....	31
6.5.	Errores de Medición.....	31
7.	Resultados	32
7.1.	Codificación de Experimentos	32
7.2.	Resultados Generales	32
7.3.	Flujos sin Ondas Rodantes.....	34
7.4.	Flujos Inestables.....	36
7.5.	Errores de Medición.....	38
8.	Conclusiones y Comentarios.....	39
8.1.	Resultados Generales	39
8.2.	Flujos Estables	39
8.3.	Flujos Inestables.....	40
8.4.	Aplicaciones a Pastas de Relaves Reales.....	41
9.	Referencias Bibliográficas	42

Índice de Figuras

Figura 3.1: Esquema de la instalación experimental	4
Figura 3.2: Esquema de los planos láser y la cámara, para medir los perfiles longitudinales	6
Figura 3.3: Esquema del plano láser y la cámara para medir el perfil transversal	7
Figura 4.1: Esquema de una medición del perfil transversal.....	10
Figura 4.2: Geometría de una medición del perfil transversal	10
Figura 4.3: Esquema de una medición del perfil transversal.....	11
Figura 4.4: Geometría de una medición del perfil longitudinal	12
Figura 5.1: Distribución de velocidades en un fluido tipo plástico de Bingham	13
Figura 5.2: Corte transversal del escurrimiento.....	19
Figura 5.3: Esquema de fuerzas sobre el fluido.....	19
Figura 5.4: Ángulo de contacto entre el fluido y la superficie	19
Figura 6.1: Reómetro Rheomat RM-180.....	21
Figura 6.2: Curva reológica esperada en los lodos.....	23
Figura 6.3: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 4% p/p.....	24
Figura 6.4: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 6% p/p.....	25
Figura 6.5: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 8% p/p.....	25
Figura 6.6: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 10% p/p.....	26
Figura 6.7: Gráfico de correlación entre el esfuerzo de fluencia y la concentración de bentonita de los lodos.....	27
Figura 6.8: Gráfico de correlación entre el coeficiente de consistencia, y la concentración de bentonita de los lodos	28
Figura 6.9: Correlación de Abulnaga	30
Figura 7.1: Gráfico de correlación entre $\frac{Fr^2}{\sin \theta}$ y Re , para los escurrimientos estables e inestables.....	33
Figura 7.2: Correlación entre b , y el cuociente $\frac{h}{\sin \theta}$ para los escurrimientos estables	34
Figura 7.3: Gráfico de $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ y $\frac{h_{min}}{h_{med}}$ v/s Fr para los escurrimientos inestables	36
Figura 7.4: Gráfico de $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ v/s el Número de Montuori, para los escurrimientos inestables	37
Figura 8.1: Esquema de un tranque de relaves	41

Índice de Tablas

Tabla 6.1: Caracterización Reológica de los Lodos	28
Tabla 6.2: Concentraciones Volumétricas de los Lodos	29
Tabla 6.3: Estimaciones de errores en la determinación de τ_f	31
Tabla 7.1: Estabilidad de Esguimientos	32
Tabla 7.2: Cálculo del Número Adimensional	35

Índice de Anexos

Anexo 1: Resultados Experimentos

Anexo 2: Resultados Caracterización Reológica de Lodos Bentoníticos

Anexo 3: Reseñas Bibliográficas

Notación Utilizada

Letra	Significado	Unidades
A	Número adimensional	-
b	Ancho de escurrimiento	m
C	Concentración de bentonita	% p/p
Fr	Número de Froude	-
F_p	Fuerza de presión	N
F_τ	Fuerza de esfuerzo de corte	N
F_σ	Fuerza de tensión superficial	N
g	Aceleración de gravedad	$m\ s^{-2}$
h	Altura de escurrimiento	m
h_f	Altura de la zona de flujo cizallado	m
h_{max}	Altura máxima de las ondas rodantes de un flujo inestable	m
h_{med}	Altura media de un flujo inestable	m
h_{min}	Altura mínima de un flujo inestable	m
h_p	Altura de la zona de flujo de tapón	m
i	Pendiente del plano	%
K	Coefficiente de consistencia	Pa s
L	Largo de la mesa de experimentación	m
M	Número de Montuori	-
n	Índice de la ley de potencia	-
Q	Caudal vertido	$m^3\ s^{-1}$
Re	Número de Reynolds	-
Re_K	Número de Reynolds utilizado con el coeficiente de consistencia	-
Re_{eq}	Número de Reynolds equivalente	-
u	Velocidad	$m\ s^{-1}$
U	Velocidad media del escurrimiento	$m\ s^{-1}$
U_p	Velocidad de la zona de flujo de tapón	$m\ s^{-1}$
α	Constante de proporcionalidad	-
β	Ángulo de contacto entre el fluido y el plano	grados
γ	Peso específico del fluido	$kg\ m^{-2}\ s^{-2}$
$\dot{\gamma}$	Tasa de deformación angular	s^{-1}
θ	Ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal	grados
θ_L	Ángulo de inclinación del rayo láser respecto a la horizontal	grados
θ_C	Ángulo de inclinación de la cámara respecto a la horizontal	grados
μ	Viscosidad dinámica	Pa s
μ_{eq}	Viscosidad dinámica equivalente	Pa s

Notación Utilizada (continuación)

Letra	Significado	Unidades
ν	Viscosidad cinemática	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ν_{eq}	Viscosidad cinemática equivalente	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ρ	Densidad del fluido	kg m^{-3}
ρ_b	Densidad de la bentonita	kg m^{-3}
τ	Esfuerzo de corte	Pa
τ_f	Esfuerzo de fluencia	Pa

1. Introducción

La minería es una de las actividades económicas que reviste mayor importancia para nuestro país, generando un porcentaje importante del PIB. En los proyectos mineros, la inversión en infraestructura suele ser muy alta, debido principalmente a la envergadura de las obras, y a la ubicación de éstas, generalmente alejadas de centros urbanos y en lugares de difícil acceso. Es por esto que la investigación en cualquier área de la industria minera, puede implicar mejoras sustanciales en el diseño y en las eficiencias de las obras de infraestructura y de los procesos productivos.

Una vez que una mina está operativa, los procesos de extracción generan subproductos de desecho llamados relaves, que corresponden al material procesado, al que se le ha extraído el mineral. Este material desechado, se presenta suspendido en agua, y a esta mezcla se le conoce como relave, la que para altas concentraciones de sólidos se denominan relaves espesados y pastas. Los relaves deben ser dispuestos apropiadamente. Para este efecto, es necesario el diseño y construcción de obras hidráulicas de conducción, tales como canales, tuberías y válvulas, y de disposición, como descargas, difusores y presas. A partir de ciertas concentraciones de sólidos, la reología de las pastas de relaves se vuelve no newtoniana, presentando un esfuerzo de fluencia. Actualmente en la minería moderna, los relaves se están volviendo más y más concentrados, debido a la necesidad de usar una menor cantidad de agua, razón por la que este comportamiento no newtoniano de las pastas se presenta frecuentemente en la industria minera.

La reología no newtoniana de las pastas de relave genera ciertos comportamientos muy distintos a los de los fluidos newtonianos. La existencia de un esfuerzo de fluencia demanda un gradiente de presiones mínimos para que la pasta comience a fluir, y además, una vez que se ha producido el escurrimiento, existe una región del fluido que se mueve con una velocidad máxima constante y uniforme, a diferencia de un fluido newtoniano que generalmente alcanza una velocidad máxima en un punto específico. Por otra parte, una pasta de relave que fluye gravitacionalmente sobre un plano infinito, se expande lateralmente hasta alcanzar un ancho máximo limitado por un equilibrio de fuerzas, debido a los efectos de presión y esfuerzo de fluencia. Los fluidos newtonianos, por su parte, se expanden lateralmente hasta que la expansión sea equilibrada por la fuerza de tensión superficial.

El propósito de este trabajo es estudiar experimentalmente las principales características del flujo de una pasta generado por una descarga puntual sobre un plano inclinado. Las pastas de relaves son representadas por una mezcla de bentonita con agua (lodos bentoníticos), las cuales son vertidas sobre una superficie inclinada. Para cada caudal experimentado se determinan perfiles transversales y longitudinales del escurrimiento, así como el ancho máximo alcanzado por el flujo.

La reología de los lodos fue determinada mediante un reómetro de cilindros concéntricos, en los laboratorios de la empresa de ingeniería BRASS Chile S.A.

Organización de la memoria

Esta memoria de título se desarrolla en 9 capítulos, comenzando con la introducción. Luego en el capítulo 2 se detallan los objetivos generales y específicos de este trabajo. A continuación se describe la instalación experimental y los sistemas de medición (cap. 3), la metodología seguida durante la experimentación, y las formas de medir las variables de los escurrimientos (cap. 4). En el capítulo 5 se revisa la bibliografía y el marco teórico del problema que se está analizando, mientras que la caracterización reológica de los lodos bentónicos es descrita en el capítulo 6. En el capítulo 7 se muestran los resultados finales determinados con los datos medidos en la experimentación, para finalmente postular las conclusiones en el capítulo 8. El capítulo 9 muestra las referencias bibliográficas consultadas.

2. Objetivos

2.1. Objetivos Generales

Los principales objetivos de esta memoria son realizar un estudio experimental del comportamiento de un flujo de una pasta tipo plástico de Bingham sobre un plano inclinado y obtener relaciones adimensionales empíricas que lo describan, de manera de poder extender estos resultados a las escalas industriales.

2.2. Objetivos Específicos

Para poder realizar este estudio se requiere inicialmente montar una instalación experimental para recrear los flujos que se requieren estudiar. Junto con el montaje de la instalación se debe diseñar y habilitar un método de medición de alturas de escurrimiento, que sea adecuado para las bajas alturas que se presentan en los experimentos.

También se deben generar lodos que simulen relaves, y que sean adecuados para la experimentación que se llevará a cabo.

Además, se necesita realizar una caracterización reológica de los lodos bentoníticos, en función de la concentración.

Finalmente, está la etapa de análisis de información, en la cual se precisa de una determinación experimental de relaciones entre las características de los flujos, y los parámetros que los definen, los que son la pendiente del plano, el caudal descargado y la reología del lodo.

3. Instalación Experimental

3.1. Partes de la Instalación

La instalación experimental se esquematiza en la figura 3.1, y consta de las siguientes partes:

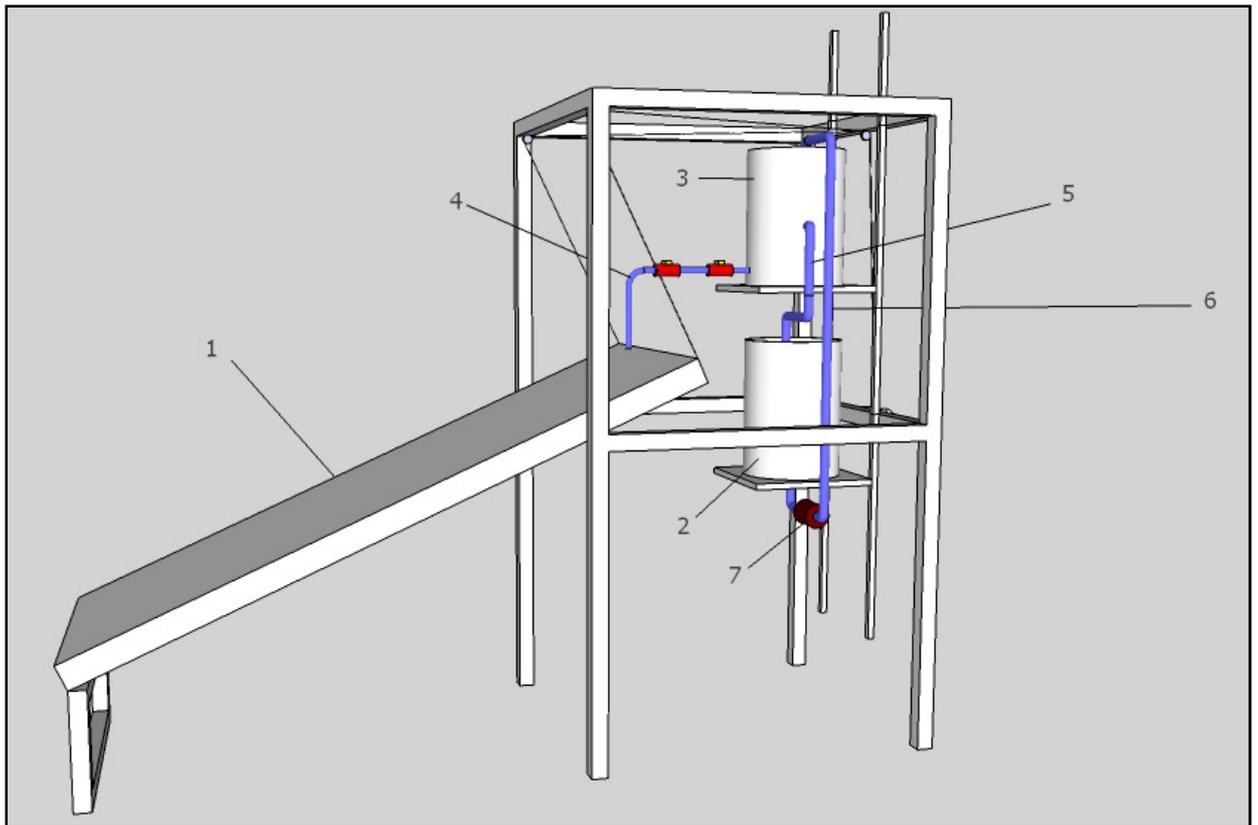


Figura 3.1: Esquema de la instalación experimental

1- Plano inclinado: Superficie de madera de 2 metros de largo por 1 m de ancho, de inclinación regulable, sostenida en un extremo por dos cables de acero, y fija en una bisagra en el extremo opuesto. Sobre esta superficie escurren los lodos. Los cables de acero se pueden retraer y extender por medio de un carrete, posibilitando de esta forma los cambios de inclinación. Sobre el plano se ha dibujado una grilla de líneas, distanciadas 5 cm una de la otra, con el objeto de facilitar las mediciones del ancho y del largo del flujo.

A los pies del plano se ubica un recipiente que recolecta los lodos, posibilitando así su reutilización.

2- Estanque de almacenamiento de lodos: Estanque de acrílico de 28 litros de capacidad. Su función es suministrar los lodos al estanque de carga.

3- Estanque de carga: Estanque de acrílico de 12 litros de capacidad. Este estanque mantiene una carga constante de lodos, posibilitando así la descarga de un caudal constante. Esta característica se logra gracias a vertederos laterales que descargan el exceso de lodos hacia el estanque de almacenamiento.

4- Tubería de descarga: tubería que nace del estanque de carga, y vierte los lodos sobre el plano. Esta tubería cuenta con 2 válvulas, una para controlar el caudal vertido, y la otra para cortar o dar completamente el paso de la mezcla.

5- Tubería del vertedero lateral: conduce el exceso de lodos desde el estanque de carga hacia el estanque de almacenamiento.

6-Tubería de alimentación de lodos: lleva los lodos desde el estanque de almacenamiento hasta el estanque de carga. Los lodos deben ser impulsados por una bomba.

7- Bomba centrífuga: impulsa los lodos desde el estanque de alimentación hasta el estanque de carga.

Esta instalación trabaja con la bomba siempre encendida, de manera de tener siempre una carga constante en el estanque superior. Cuando se vierten los lodos sobre el plano, parte del caudal bombeado retorna al estanque de almacenamiento.

3.2. Dispositivos de Medición

Se registra la imagen de la lengua de fluido con una foto, que se toma con una cámara digital (con flash). Esta imagen permite ver la forma del escurrimiento sobre el fondo cuadriculado, permitiendo determinar las dimensiones de ancho y largo de éste.

Para determinar la altura del flujo se emplean planos generados por rayos láser. Cada uno de ellos despliega un plano sobre la superficie inclinada, el cual incide de manera oblicua generando una línea recta. Existen 3 planos de iluminación que describen líneas verticales (longitudinales al escurrimiento), como se puede apreciar en la figura 3.2, y otro plano traza una línea transversal (figura 3.3). Los lodos al fluir plano abajo con una cierta altura, causan un desplazamiento de la ubicación de estas 4 líneas respecto a la posición inicial registrada sobre el plano de escurrimiento.

Para captar estos desplazamientos, se utilizan dos cámaras, que captan imágenes digitales. Una cámara está enfocada sobre los planos de iluminación longitudinales (figura 3.2), mientras la otra graba el transversal (figura 3.3). Las imágenes generadas son posteriormente analizadas computacionalmente, determinando así la magnitud del desplazamiento de las líneas luminosas, y con esto la altura del escurrimiento.

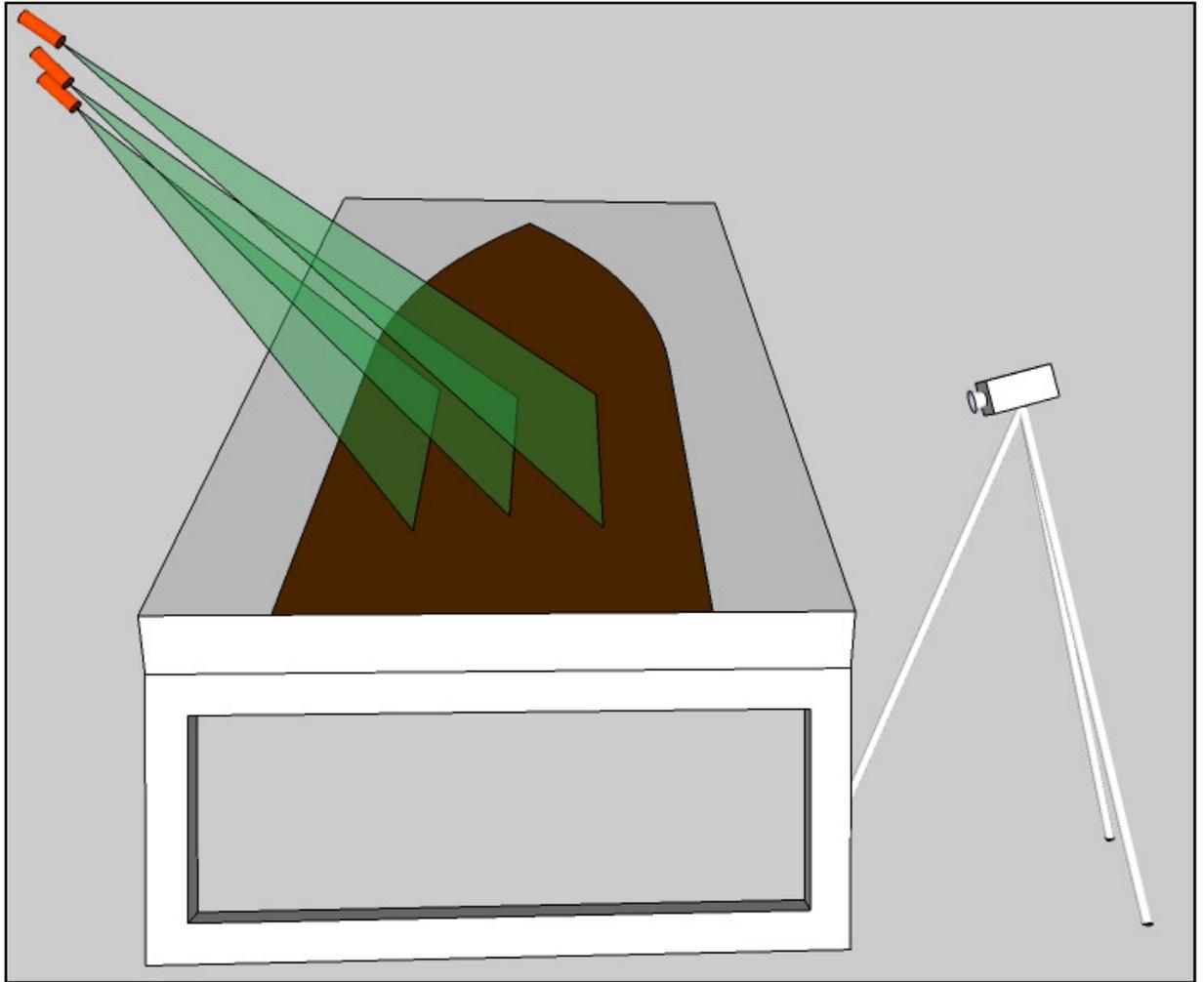


Figura 3.2: Esquema de los planos láser y la cámara, para medir los perfiles longitudinales

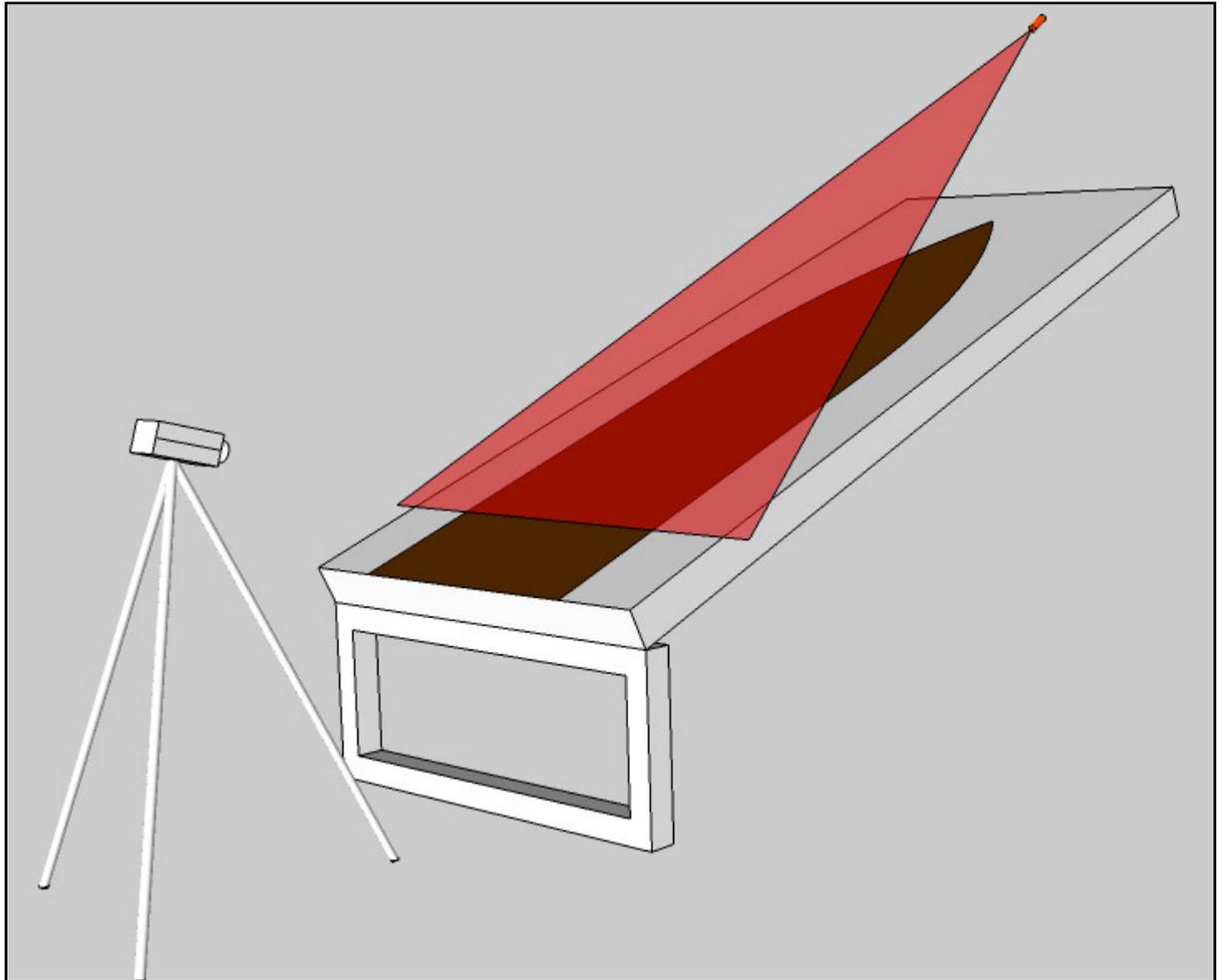


Figura 3.3: Esquema del plano láser y la cámara para medir el perfil transversal

Cámara Oscura

Toda la estructura que conforma la instalación se encuentra en una cámara oscura, formada por un soporte de tubos de PVC, con forma de cubo, y trozos de tela negra adosados a él. La tela rodea toda la estructura de PVC, creando un ambiente oscuro en el interior. La oscuridad es esencial para realizar las mediciones anteriormente descritas.

4. Metodología

4.1. Actividades Previas

1. Mediciones

Antes de iniciar un conjunto de experimentos, se deben realizar ciertas mediciones de datos comunes a todos ellos, como la inclinación del plano, la inclinación de los rayos láser incidentes, y las inclinaciones de los ejes visuales de las cámaras.

Además, ambas cámaras deben captar una referencia de medición, de manera que antes de iniciar cada experimento se toma una fotografía al plano con las líneas. Esta referencia será usada para determinar las alturas de escurrimiento.

Las inclinaciones del plano inclinado que se experimentarán son 20%, 35%, 50% y 65%.

2. Preparación de los lodos

Los lodos son preparados con distintas concentraciones de bentonita, y vertidos en los estanques de la instalación. Durante el estudio se experimentará con lodos de las siguientes concentraciones en peso de bentonita: 4%, 6%, 8%, 9% y 10%.

4.2. Metodología de Experimentación y Análisis

1. Medición de caudal

Una vez que los lodos están preparados y dispuestos en los estanques, y la bomba funcionando, el primer paso es medir el caudal a descargar durante el experimento. Manteniendo la válvula reguladora fija, se abre totalmente la válvula de corte y se afora el caudal descargado con una probeta y un cronómetro. Se repite el aforo 3 veces, y se calcula un caudal promedio.

Para cada concentración e inclinación, se descargarán 4 caudales distintos.

2. Desarrollo del flujo sobre el plano

En esta etapa se abre totalmente la llave de paso (sin alterar la válvula reguladora de caudal), dejando que los lodos fluyan por el plano. El lodo se deja fluir durante un tiempo, hasta que se observe que se ha alcanzado un flujo uniforme, proceso que puede tomar entre unos pocos segundos para las concentraciones bajas, hasta varios minutos para concentraciones altas y caudales bajos.

3. Medición de perfiles del flujo

Una vez alcanzado el flujo uniforme, se proyectan los planos de iluminación láser longitudinales al escurrimiento, y se graban las líneas que se generan al intersectar estos planos la superficie del escurrimiento con la cámara de alta velocidad dispuesta

lateralmente al plano. Luego se repite el procedimiento con la línea generada transversalmente al flujo, y se graba con la cámara correspondiente, la que se ubica frente al plano. Finalmente, se toma una fotografía con flash (dentro de la cámara oscura) desde el frente del plano, para registrar la forma del escurrimiento.

4. Análisis de imágenes

Luego del experimento, las imágenes obtenidas en foto y video son procesadas computacionalmente, para obtener los datos buscados.

La foto que retrata la forma del escurrimiento, es analizada directamente, de forma de determinar el ancho máximo alcanzado por el flujo, el que es medido en la parte baja del plano inclinado.

Las imágenes obtenidas con los planos de iluminación son transformadas en archivos digitales de imágenes, los cuales son procesados digitalmente con el software MATLAB, para determinar la altura del escurrimiento.

5. Análisis de datos

Una vez digitalizados los datos, éstos son analizados para verificar consistencia y descartar posibles errores. Luego son graficados, organizados por igualdad de tipos de lodos, caudal e inclinación del plano.

4.3. Fórmulas para la Medición de la Altura de Esguerramiento

Para determinar la altura de esguerramiento, las cámaras captan las imágenes que permiten visualizar y medir el desplazamiento de las líneas formadas por los rayos láser, como fue explicado en el capítulo 3.2. Dicho desplazamiento está determinado por la altura del fluido, así como por los ángulos de incidencia de los rayos láser, el ángulo de inclinación del plano, y el ángulo de visión de las cámaras.

A continuación se muestra un esquema de una medición de un perfil transversal, con todos los ángulos involucrados:

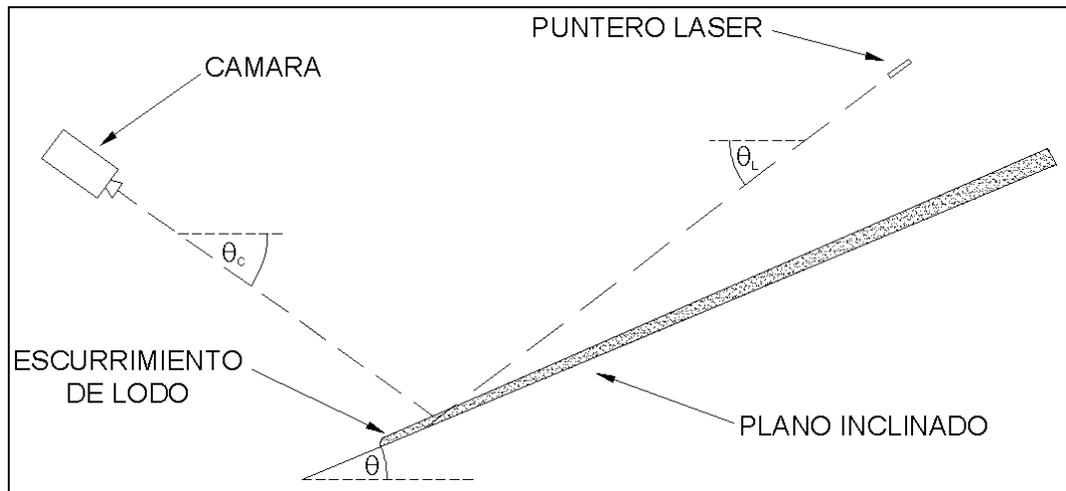


Figura 4.1: Esquema de una medición del perfil transversal

Si se analiza la geometría que se forma en la intersección del plano láser y el plano inclinado se observa lo siguiente:

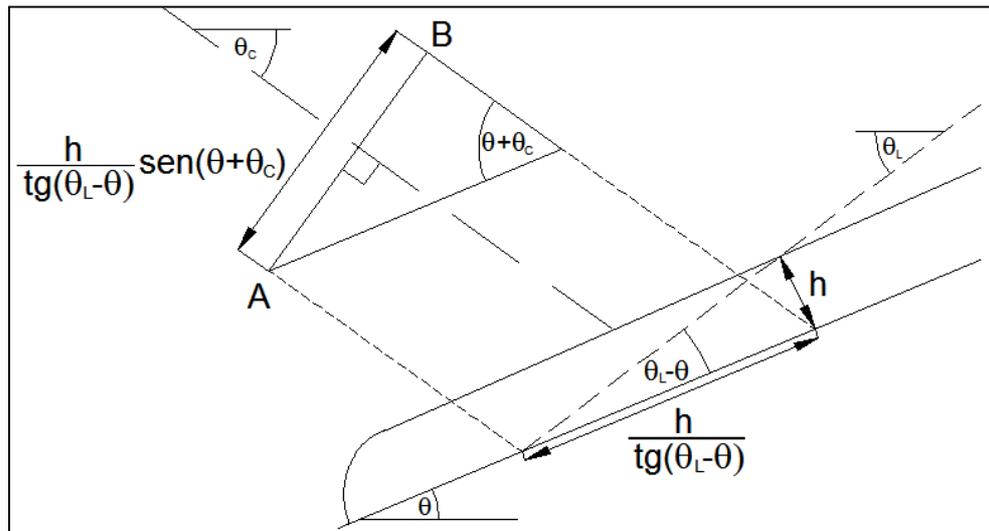


Figura 4.2: Geometría de una medición del perfil transversal

Entonces, el desplazamiento de la línea visualizado por la cámara, desde el punto A al punto B, es igual a:

$$d_{AB} = \frac{h}{\operatorname{tg}(\theta_L - \theta)} \operatorname{sen}(\theta + \theta_C)$$

Entonces la altura se determina con la expresión:

$$h = \frac{d_{AB} \operatorname{tg}(\theta_L - \theta)}{\operatorname{sen}(\theta + \theta_C)} \quad (4.1)$$

Esta fórmula es utilizada para calcular la altura en cada punto del perfil transversal. Con este conjunto de datos se calcula un promedio espacial de la altura, en cada imagen captada. Con los promedios espaciales de las fotos se calcula un promedio temporal. Este promedio es la altura media transversal de cada experimento.

Los perfiles longitudinales son determinados a partir de la geometría que se muestra en el esquema siguiente:

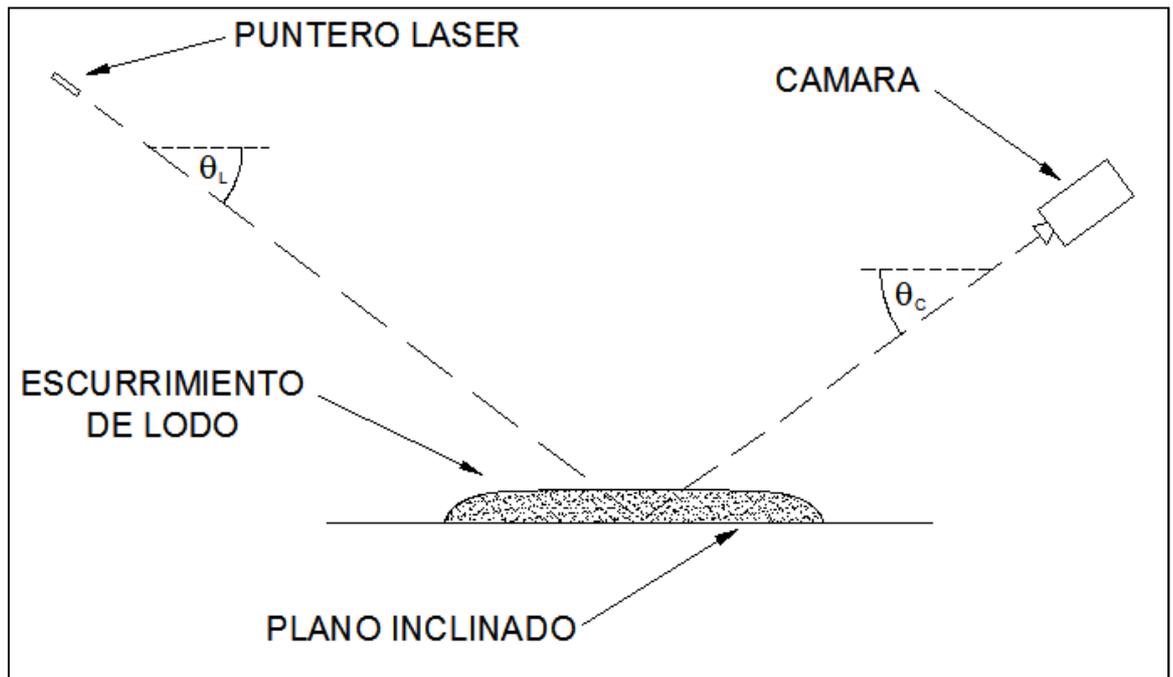


Figura 4.3: Esquema de una medición del perfil transversal

Si se hace un acercamiento a la zona en donde el plano laser intersecta el plano inclinado, se observa la siguiente geometría:

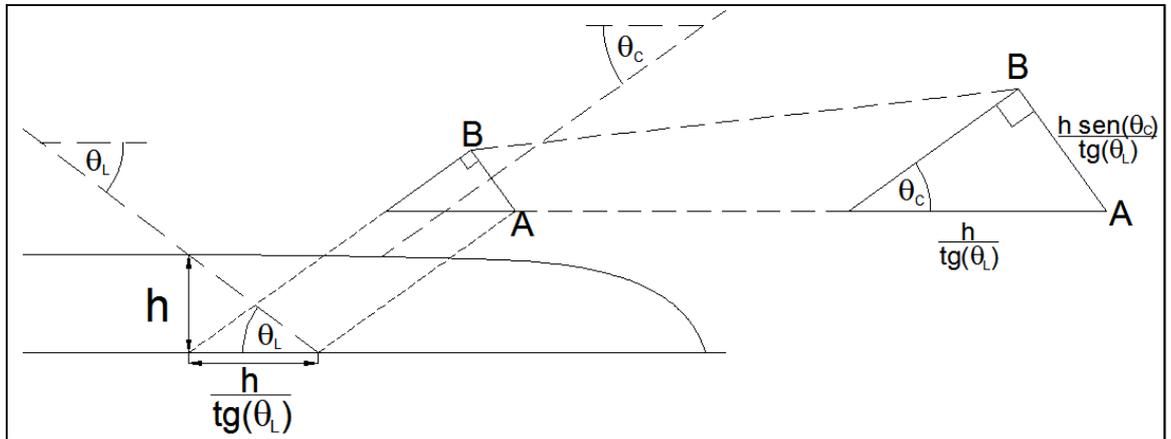


Figura 4.4: Geometría de una medición del perfil longitudinal

Entonces, el desplazamiento de la línea visualizado por la cámara, desde el punto A al punto B, es igual a:

$$d_{AB} = \frac{h \operatorname{sen}(\theta_c)}{\operatorname{tg}(\theta_L)}$$

Entonces la altura se determina con la expresión:

$$h = \frac{d_{AB} \operatorname{tg}(\theta_L)}{\operatorname{sen}(\theta_c)} \quad (4.2)$$

Esta fórmula es utilizada para calcular la altura en cada punto del perfil longitudinal. Con este conjunto de datos se calcula un promedio espacial y temporal de la altura, para cada uno de los 3 rayos láser.

Esta fórmula es utilizada para calcular la altura en cada punto del perfil longitudinal. Con este conjunto de datos se calcula un promedio espacial de la altura, en cada imagen captada. Con los promedios espaciales de las fotos se calcula un promedio temporal, para cada uno de los 3 rayos láser. Estos 3 datos constituyen las 3 alturas medias longitudinales de cada experimento.

Ambos tipos de perfiles son medidos en la parte baja del plano inclinado, de manera de asegurar que el escurrimiento haya alcanzado su ancho máximo, y no esté influenciado por las perturbaciones existentes en las cercanías de la descarga.

5. Revisión Bibliográfica y Marco Teórico

5.1. Revisión Bibliográfica

Existen numerosos trabajos publicados acerca de fluidos no newtonianos. Las investigaciones han abordado tópicos variados, como flujos en canales rectangulares¹, o de formas diversas², o estudios experimentales de descargas repentinas de volúmenes fijos de lodo bentonítico³.

Un tema interesante es la distribución de velocidades en un plástico de Bingham fluyendo por acción de la gravedad sobre un plano inclinado, como puede ser encontrado en Huang y García⁴, en donde, tomando como base la ecuación reológica constitutiva de los plásticos de Bingham en un canal de ancho infinito, y la variación del esfuerzo de corte en el escurrimiento, se deduce que el flujo tiene dos zonas con distribuciones de velocidades distintas: la zona de “flujo cizallado” (shear-flow), y la zona de “flujo de tapón” (plug-flow), como se muestra en la figura 5.1:

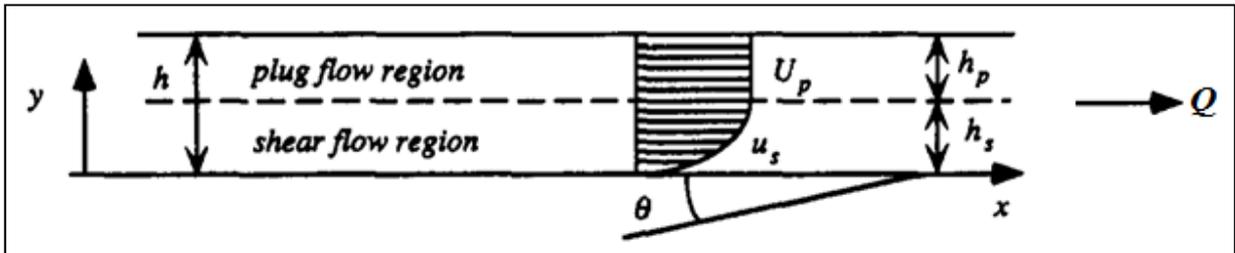


Figura 5.1: Distribución de velocidades en un fluido tipo plástico de Bingham

En la zona de flujo cizallado se tiene una distribución parabólica de velocidades, y en la zona de flujo de tapón se tiene una velocidad constante, debido a que en esta zona el esfuerzo de corte es inferior al esfuerzo de fluencia.

A partir de todas esas condiciones se deducen las ecuaciones de la distribución de velocidad, y los valores de las alturas h_s y h_p (según la notación del presente trabajo dichas variables son escritas como h_f y h_p , respectivamente) en función de la densidad del fluido, el esfuerzo de fluencia, el coeficiente de consistencia (llamado μ en dicho documento y K en este estudio), la inclinación del plano, y la altura total de escurrimiento.

¹ ALDERMAN, N.J. & HALDENWANG, R. (2007) "A review of Newtonian and non-Newtonian flow in rectangular open channels". *Hydrotransport 17. The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy and the BHR Group.

² WHIPPLE, K. (1997) "Open-Channel Flow of Bingham Fluids: Applications in Debris-Flow Research". *The Journal of Geology*, volume 105, p.243-262.

³ CHANSON, H., JARNY, S., TOCQUER, L., & COUSSOT, P. (2004) "An Experimental Study of Sudden Release of Bentonite Suspensions down an Inclined Chute". *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, The University of Sydney, Sydney, Australia, 13-17 Diciembre 2004.

⁴ HUANG, X., & GARCIA, H. (1997) "A Perturbation Solution for Bingham-Plastic Mudflows". *Journal of Hydraulic Engineering*, Nov 1997, p. 986-994.

Asimismo, se determina la velocidad media de un escurrimiento bidimensional, uniforme y permanente de un plástico de Bingham sobre un plano inclinado de ángulo θ , ancho infinito, está dada por la expresión:

$$U = \frac{\rho g h_f^2 \sin \theta}{2K} \left(1 - \frac{h_f}{3h} \right) \quad (5.1)$$

Otro tema interesante es la estabilidad de flujos, y las condiciones necesarias para que los flujos inestables ocurran, con desarrollo de ondas rodantes. Existen numerosas publicaciones que tratan acerca del tema. Un trabajo que es de particular interés y aplicabilidad en este estudio, es el artículo de Coussot⁵, en donde se puede encontrar un criterio aplicable al presente experimento. El autor comienza su trabajo basándose en el modelo de Herschel y Bulkley, para luego utilizar una aproximación propuesta por Trowbridge⁶ para llegar al siguiente criterio de inestabilidad:

$$Fr > \frac{(m+1)G^2 - mG - 1}{(m+1)^2G^2 + mG + 1}$$

En donde:

$$G = \frac{\rho g h \sin \theta}{\tau_f}; m = \frac{1}{n}$$

G es un número adimensional que representa la relación entre los esfuerzos gravitacionales y los esfuerzos de fluencia, y el número n corresponde al exponente de la ley de potencia, que para el caso de los lodos bentoníticos es $n=1$, con lo que el criterio anterior se resume en la expresión:

$$Fr > \frac{2G^2 - G - 1}{4G^2 + G + 1} \quad (5.2)$$

Para facilitar la visualización de este criterio, se define el número adimensional A , como se muestra a continuación:

$$A \equiv \frac{2G^2 - G - 1}{4G^2 + G + 1} Fr \quad (5.3)$$

Con esto, la condición necesaria para que el flujo sea inestable frente a la aparición de ondas rodantes se resume en:

$$A > 1 \quad (5.4)$$

⁵ COUSSOT, P. (1994) "Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel". *Journal of Hydraulic Research*, vol. 32, N°4, p.535-559.

⁶ TROWBRIDGE, J.H. (1987) "Instability of concentrated free surface flows", *Journal of Geophysical Research*, 92 (C9), p. 9523-9530.

Existen otros estudios que tratan acerca de los escurrimientos de fluidos no-newtonianos, pero no tienen una relación tan directa con el presente estudio. Los trabajos más importantes son reseñados en el anexo 3.

5.2. Marco Teórico

5.2.1. Distribución de Velocidades

A partir de la ecuación (5.1), si se reemplaza el valor de h_f por $h-h_p$, se tiene:

$$U = \frac{\rho g (h - h_p)^2 \sin \theta}{2K} \left(1 - \frac{(h - h_p)}{3h} \right)$$

Y se puede seguir desarrollando la expresión de la siguiente forma:

$$U = \frac{\rho g (h - h_p)^2 \sin \theta}{6K} \left(2 + \frac{h_p}{h} \right)$$

Esta expresión se puede ordenar como sigue:

$$U = \frac{\rho g h^2 \sin \theta}{6K} \left(1 - \frac{h_p}{h} \right)^2 \left(2 + \frac{h_p}{h} \right)$$

Lo que es lo mismo que:

$$\frac{U^2}{gh} = \frac{Uh}{K/\rho} \sin \theta \frac{1}{6} \left(1 - \frac{h_p}{h} \right)^2 \left(2 + \frac{h_p}{h} \right)$$

Y entonces tenemos una relación entre los números adimensionales de Froude y Reynolds:

$$Fr^2 = Re_K \sin \theta \frac{1}{6} \left(1 - \frac{h_p}{h} \right)^2 \left(2 + \frac{h_p}{h} \right) \quad (5.5)$$

En donde:

$$Re_K = \frac{Uh}{K/\rho}$$

Si se analizan los casos límites, se tiene:

Si $\frac{h_p}{h} = 0$ entonces $\tau_f = 0$ (caso de fluido newtoniano), entonces la magnitud K pasa a ser la viscosidad dinámica, y la ecuación anterior pasa a ser la siguiente:

$$Fr^2 = \alpha Re \sin \theta \quad (5.6)$$

En donde $\alpha = \frac{1}{3}$ corresponde a la relación teórica entre Fr y Re para fluidos newtonianos.

Si $\frac{h_p}{h} = 1$ entonces $Fr=0$ y no hay escurrimiento, que es lo que ocurre con los plásticos de Bingham si $\tau < \tau_f$, en todo el volumen de fluido.

Para poder comparar la relación de Fr y Re en el caso de los lodos bentoníticos, y efectuar una comparación con el caso de los fluidos newtonianos, es necesario definir un número de Reynolds equivalente. Con este objetivo, se sigue desarrollando la expresión (5.6), y además se define una “viscosidad cinemática equivalente” para calcular el valor de Re , a partir de la definición de una “viscosidad dinámica equivalente”, basada en la ecuación reológica constitutiva de un fluido newtoniano:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \leftrightarrow \mu_{eq} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Por otra parte, la ecuación reológica de un plástico de Bingham es:

$$\tau = \tau_f + K \dot{\gamma} \quad (5.7)$$

Si se divide la ecuación (5.6) por la variación temporal de la deformación angular, se define la viscosidad dinámica equivalente para un plástico de Bingham:

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_f}{\dot{\gamma}} + K \leftrightarrow \mu_{eq} = \frac{\tau_f}{\dot{\gamma}} + K$$

Y en un flujo con una profundidad h , la escala de $\dot{\gamma}$ se estima como $\frac{U}{h}$:

$$\mu_{eq} = \frac{\tau_f}{U/h} + K$$

Finalmente, la viscosidad cinemática equivalente es igual a:

$$\nu_{eq} = \frac{1}{\rho} \left(K + \frac{\tau_f h}{U} \right)$$

Además, la velocidad se calcula como en el caso de un canal muy ancho:

$$U = \frac{Q}{bh}$$

Reemplazando las expresiones para U y v_{eq} en la ecuación (5.6) se llega a lo siguiente:

$$\frac{Q^2}{gb^2h^3} = \alpha \frac{\frac{Q\rho}{b}}{K + \frac{\tau_f bh^2}{Q}} \text{sen } \theta$$

Hay 2 casos límites, el primero está dado por $K \ll \frac{\tau_f bh^2}{Q}$. En este caso se llega a la expresión:

$$\frac{\tau_f}{\gamma \text{sen } \theta} = \alpha h \quad (5.8)$$

O bien,

$$\tau_f = \alpha \gamma h \text{sen } \theta \quad (5.9)$$

Por el contrario en el caso en que $K \gg \frac{\tau_f bh^2}{Q}$, se tiene un fluido con un comportamiento que se acerca al de un fluido newtoniano, y la ecuación pasa a ser la (5.6), con $\alpha = \frac{1}{3}$.

5.2.2. Equilibrio en una Sección Transversal

Si se realiza un corte transversal del fluido fluyendo sobre el plano inclinado, tenemos una situación como la siguiente:

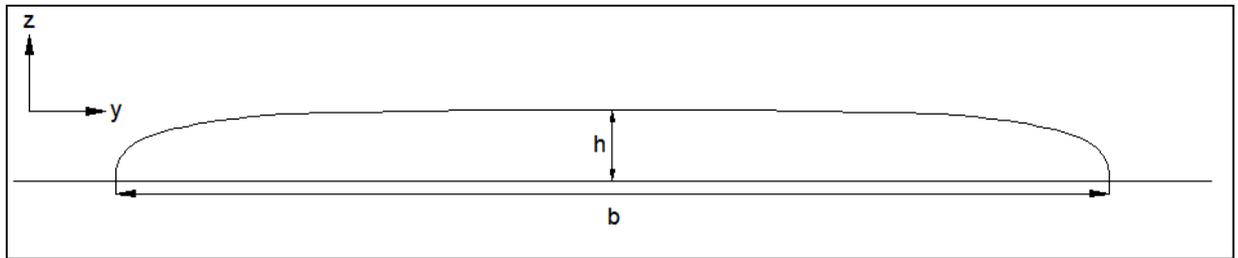


Figura 5.2: Corte transversal del escurrimiento

Si tomamos la mitad izquierda del fluido, tenemos las siguientes fuerzas en el eje y:



Figura 5.3: Esquema de fuerzas sobre el fluido

Con $F_{\tau} = \tau_f \frac{b}{2} dx$, $F_p = \frac{1}{2} \gamma h^2 dx$, $F_{\sigma 1} = \sigma dx$, y $F_{\sigma 2} = \sigma \cos \beta dx$, en donde σ es el coeficiente de tensión superficial, y β es el ángulo de contacto del fluido con la superficie, como se ve en la siguiente figura:

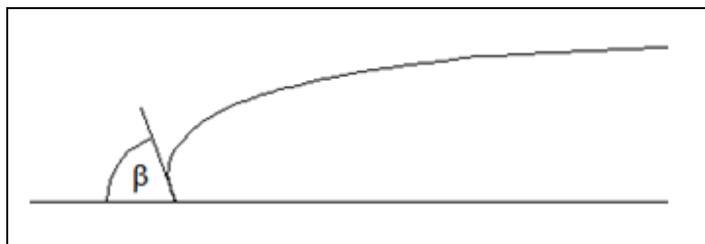


Figura 5.4: Ángulo de contacto entre el fluido y la superficie

El balance de fuerzas resultante es el siguiente:

$$F_{\tau} + F_{\sigma 1} + F_{\sigma 2} = F_p$$

$$\tau_f \frac{b}{2} dx + \sigma(1 + \cos \beta) dx = \frac{1}{2} \gamma h^2 dx$$

$$\tau_f b + 2\sigma(1 + \cos \beta) = \gamma h^2 \quad (5.10)$$

La fuerza de tensión superficial no ha sido medida debido a la inherente dificultad que existe para poder percibir sus efectos en un escurrimiento abierto. Por lo tanto el término de tensión superficial es descartado del análisis de fuerzas. Por lo tanto la expresión (5.10) pasa a transformarse en:

$$\tau_f b = \gamma h^2 \quad (5.11)$$

Durante el proceso de análisis y conclusiones, en donde se utilice esta expresión, se tendrá en cuenta que existen los efectos de tensión superficial, aunque no están explicitados en la ecuación.

Si se reemplaza el valor de τ_f de la expresión (5.9) en la expresión (5.11), se llega a la siguiente relación:

$$\alpha \gamma h \sin \theta b = \gamma h^2$$

Por lo tanto:

$$\alpha b = \frac{h}{\sin \theta} \quad (5.12)$$

O de forma adimensional:

$$\alpha = \frac{h}{b \sin \theta}$$

Si, por el contrario, se reemplaza el valor de h de la expresión (5.8) en la expresión (5.11), se llega a la siguiente constante:

$$\alpha^2 = \frac{\tau_f}{b \gamma \sin^2 \theta} \quad (5.13)$$

6. Caracterización Reológica de los Lodos

6.1. Instalación Experimental

Las mediciones se realizan con el reómetro Rheomat RM-180, de propiedad de la empresa BRASS Chile S.A., el cual se puede ver en la figura 4. Este instrumento trabaja haciendo girar un cilindro en un tubo, con una pequeña separación de aproximadamente 2 mm entre ellos.



Figura 6.1: Reómetro Rheomat RM-180

El equipo aplica una velocidad de rotación constante al cilindro interior, y mide el esfuerzo de corte aplicado sobre él.

La tasa de giro máxima es de 1200 revoluciones por minuto, correspondiente a una tasa de deformación angular de 236 s^{-1} .

Las mediciones se realizan sobre 4 tipos de lodos distintos:

- Lodo bentonítico con un 4% de concentración
- Lodo bentonítico con un 6% de concentración
- Lodo bentonítico con un 8% de concentración
- Lodo bentonítico con un 10% de concentración

6.2. Metodología

Para tener la curva reológica de un fluido, es necesario realizar experimentos con varias velocidades distintas. Es por esto que se realizan experimentos con saltos de 100 RPM, en el rango comprendido entre 1200 RPM y 100 RPM.

Esto es equivalente al rango de tasa de deformación de 19 s^{-1} a 236 s^{-1} .

Para tener una mayor precisión de los resultados, se realizan 36 experimentos para cada lodo, de manera de tener 3 puntos en cada velocidad de rotación.

La forma de realizar las repeticiones es partiendo con 100 RPM, luego ir aumentando con incrementos de 100 RPM hasta llegar a 1200 RPM, luego continuar con decrementos de 100 RPM hasta volver a 100 RPM, para finalmente terminar la serie de experimentos aumentando 100 RPM cada vez hasta llegar a los 1200 RPM nuevamente.

La metodología para realizar cada experimento individual es la siguiente:

1. Preparar y agitar los lodos
2. Verter los lodos en un jarro especial (como el de la figura 4)
3. Preparar el equipo digital del reómetro para la medición. Ingresar la tasa de rotación a utilizar, y comenzar con la rotación del cilindro.
4. Revolver el jarro con la mezcla.
5. Rápidamente, introducir los cilindros en el jarro con lodo.
6. Registrar el valor de esfuerzo de corte indicado por el reómetro.
7. Repetir el experimento con una nueva velocidad de rotación.

Con cada serie de datos obtenida, se espera encontrar una curva reológica de la forma:

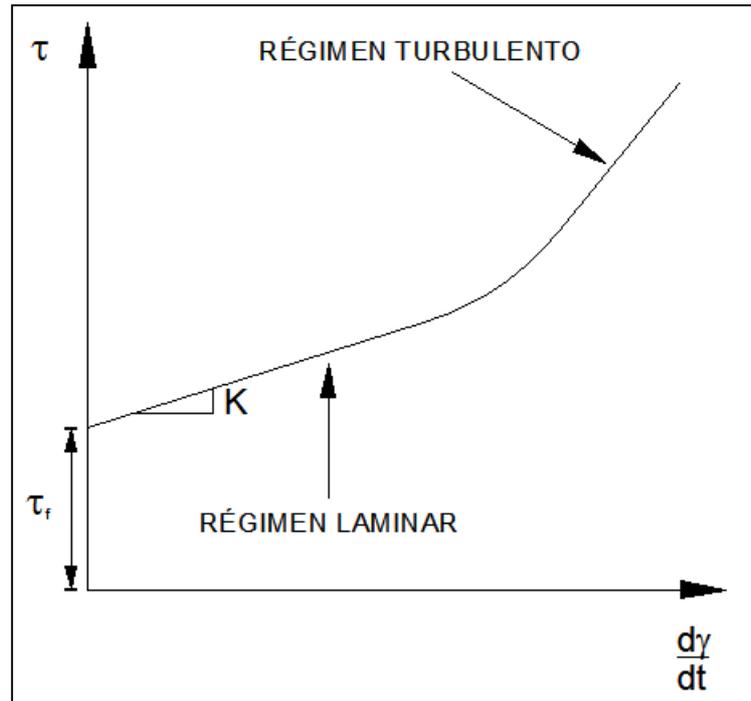


Figura 6.2: Curva reológica esperada en los lodos

El objetivo principal es encontrar los valores del esfuerzo de fluencia (τ_f), y el coeficiente de consistencia (K), para los cuatro lodos.

Observaciones:

El reómetro es un instrumento muy sensible, y debido a la naturaleza del experimento, las lecturas del paso 6, no son de un número fijo en el tiempo, sino que la lectura del instrumento va variando. El valor que se toma es el valor que alcanza un periodo de estabilidad, al inicio de la prueba.

La bentonita utilizada para preparar los lodos tiene una pequeña cantidad de arena, la cual puede producir pequeñas alteraciones en los resultados de las mediciones.

6.3. Resultados

Para elaborar las curvas reológicas de cada lodo, se grafican los promedios de los 3 datos obtenidos en cada tasa de deformación.

En cada curva se ha separado la zona laminar (en negro) de la zona turbulenta (en rosado), y se han añadido líneas de tendencia. Con los puntos correspondientes a la zona laminar se han obtenido el esfuerzo de fluencia (τ_f) y el coeficiente de consistencia (K) para cada lodo.

La totalidad de los datos obtenidos se adjunta en el anexo 3. Los gráficos con las curvas resultantes se muestran a continuación:

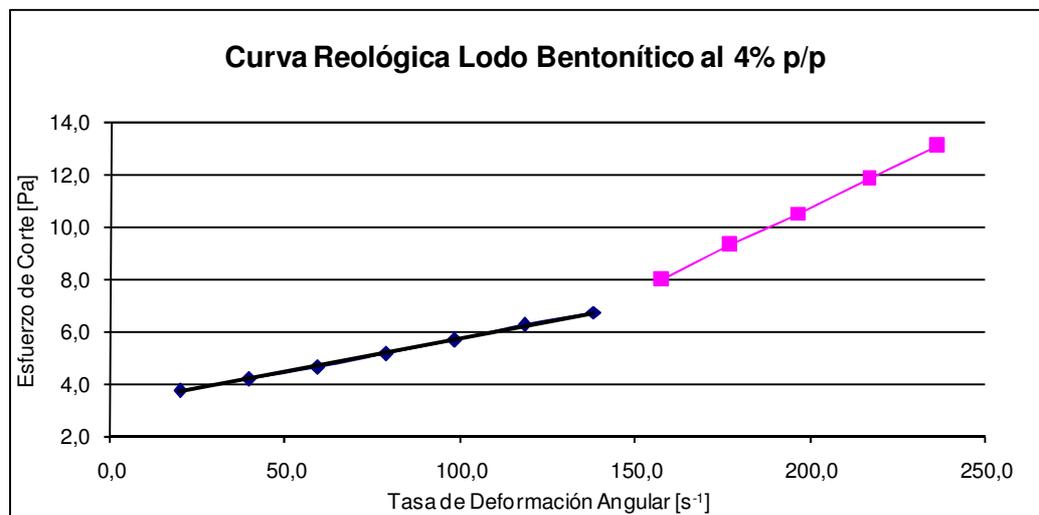


Figura 6.3: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 4% p/p

Ecuación de la zona laminar: $\tau = 0,025\dot{\gamma} + 3,17$; $R^2 = 0,99$

Con esto se obtiene, para el lodo con 4% de concentración:

$$\tau_f = 3,17 Pa ; K = 0,025 Pa \cdot s$$

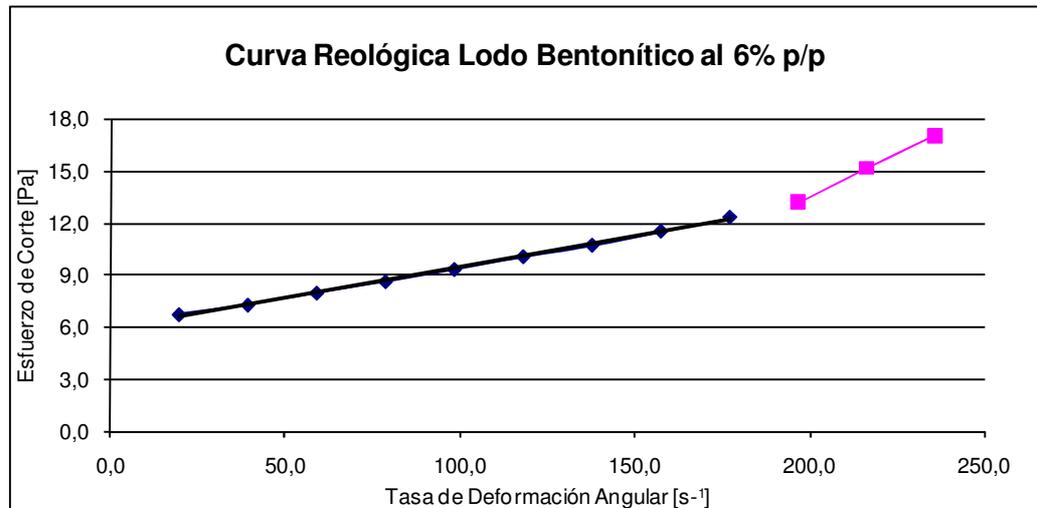


Figura 6.4: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 6% p/p

Ecuación de la zona laminar: $\tau = 0,035\dot{\gamma} + 5,89$; $R^2 = 0,99$

Con esto se obtiene, para el lodo con 6% de concentración:

$$\tau_f = 5,89 \text{ Pa} ; K = 0,035 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

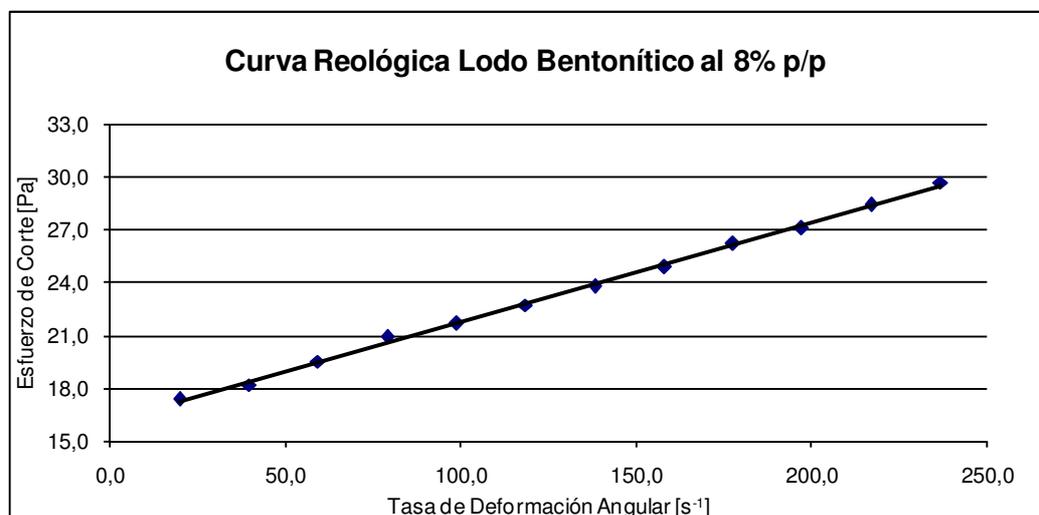


Figura 6.5: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 8% p/p

Ecuación de la zona laminar: $\tau = 0,056\dot{\gamma} + 16,14$; $R^2 = 0,99$

Con esto se obtiene, para el lodo con 8% de concentración:

$$\tau_f = 16,14 \text{ Pa} ; K = 0,056 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

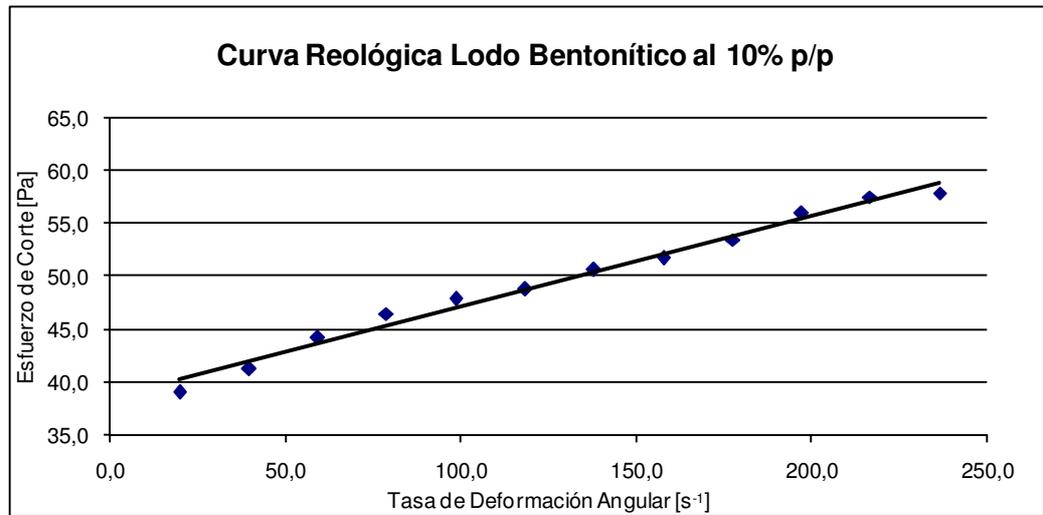


Figura 6.6: Curva de caracterización reológica del lodo bentonítico al 10% p/p

Ecuación de la zona laminar: $\tau = 0,086\dot{\gamma} + 38,61$; $R^2 = 0,98$

Con esto se obtiene, para el lodo con 10% de concentración:

$$\tau_f = 38,61 Pa ; K = 0,086 Pa \cdot s$$

Los datos obtenidos para las 4 concentraciones de bentonita, permiten hacer una correlación entre la concentración de bentonita y el esfuerzo de fluencia de los lodos, añadiendo una línea de tendencia de los puntos, como se muestra a continuación:

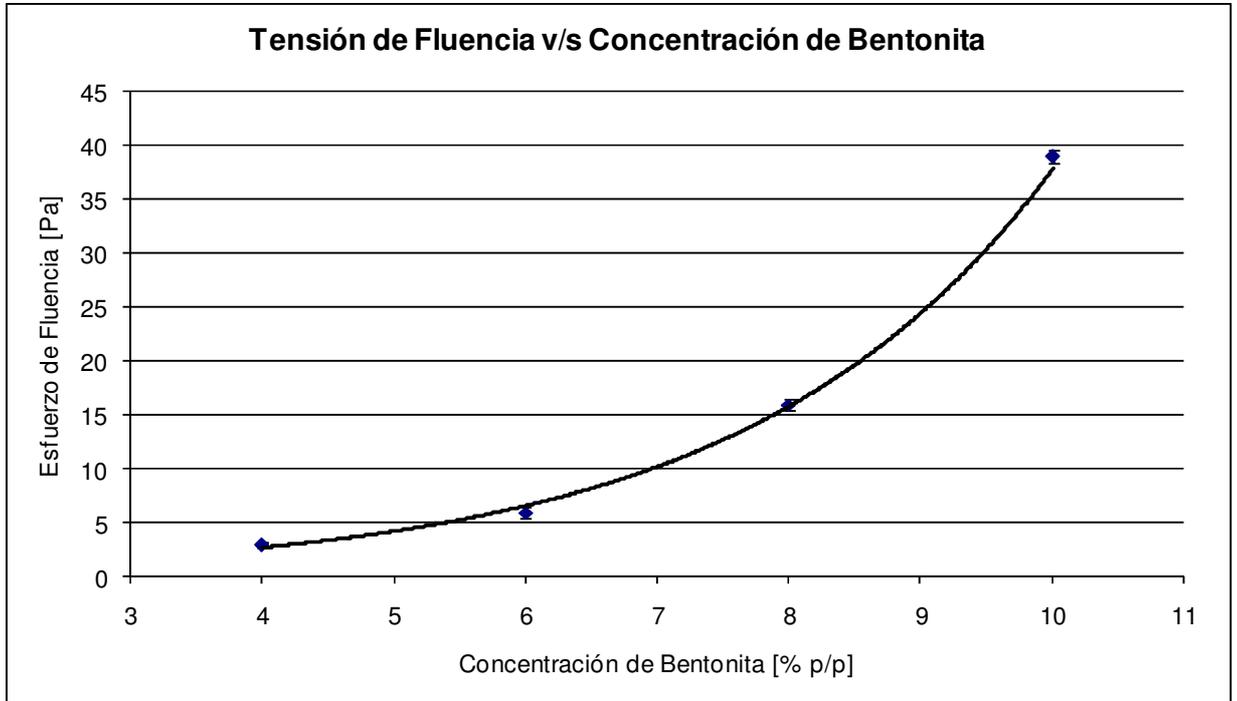


Figura 6.7: Gráfico de correlación entre el esfuerzo de fluencia y la concentración de bentonita de los lodos

La curva de tendencia de este gráfico es exponencial, y su ecuación es:

$$\tau_f = 0,49 \cdot \exp(0,43 \cdot C) ; R^2 = 0,99$$

Asimismo, los datos obtenidos con las 4 diferentes concentraciones de bentonita, permiten efectuar una correlación entre la concentración de bentonita y el coeficiente de consistencia, añadiendo una línea de tendencia de los puntos:

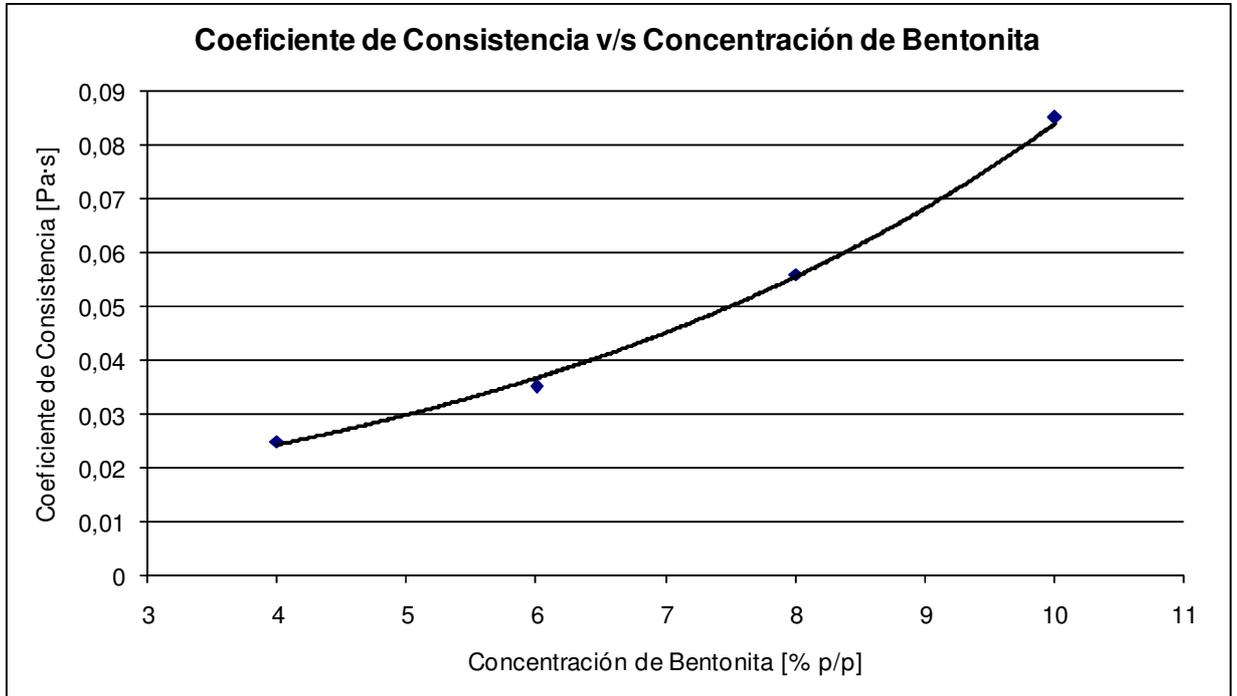


Figura 6.8: Gráfico de correlación entre el coeficiente de consistencia, y la concentración de bentonita de los lodos

La curva de tendencia de este gráfico es exponencial, y su ecuación es:

$$K = 0,01 \cdot \exp(0,207 \cdot C) ; R^2 = 0,99$$

Estas curvas de tendencia para los valores de τ_f y K, son utilizadas para determinar las características reológicas de los lodos utilizados en los experimentos de este trabajo.

Los valores de los parámetros que definen la reología de los lodos bentoníticos son:

Tabla 6.1: Caracterización Reológica de los Lodos

Concentración del Lodo [% p/p]	τ_f [Pa]	K [Pa·s]
4	3	0,02
6	6	0,04
8	16	0,06
9	24	0,07
10	38	0,08

Existen resultados de este tipo en otros trabajos, que han encontrado relaciones exponenciales entre la concentración de bentonita de un lodo, y su coeficiente de consistencia, como es el caso del estudio de Montserrat, Tamburrino y Niño⁷.

Existen otros métodos para aproximar el valor de la viscosidad (en este caso el coeficiente de consistencia K), como la interpolación cuadrática-exponencial expuesta por Abulnaga⁸:

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + K_1\phi + K_2\phi^2 + A \exp(B\phi)$$

En donde:

μ_m : Viscosidad de la mezcla

μ_L : Viscosidad del líquido solvente de la mezcla

ϕ : Concentración volumétrica de sólidos

$K_2=10,05$

$A=0,00273$

$B=16,6$

Los valores de ϕ se determinan considerando que la densidad de la bentonita es:

$$\mu_B = 2600 \frac{kg}{m^3}$$

Dando como resultado las siguientes concentraciones volumétricas de lodos:

Tabla 6.2: Concentraciones Volumétricas de los Lodos

Concentración del lodo en masa	Concentración del lodo en volumen
[%]	[%]
4	1,58
6	2,40
8	3,24
10	4,10

Y la viscosidad de la mezcla es el valor de K encontrado para cada lodo.

El coeficiente K_1 , se determina con una regresión lineal con los datos de ϕ y K , dando como resultado:

$$K_1=1805$$

⁷ MONTSERRAT, S., TAMBURRINO, A., NIÑO, Y. (2005) "Estudio experimental de la presencia de barreras en flujos detríticos". *Ingeniería del Agua*, Vol. 12, N° 3, pp. 217-229.

⁸ ABULNAGA, B. "Slurry Systems Handbook". USA. Mc Graw-Hill 2002. p. 1.22

Con lo que la expresión queda de la siguiente forma:

$$\frac{K}{\mu_{AGUA}} = 1 + 1805 \phi + 10,05 \phi^2 + 0,00273 \exp(16,6 \phi)$$

El resultado de esta aproximación se puede visualizar en el gráfico siguiente:

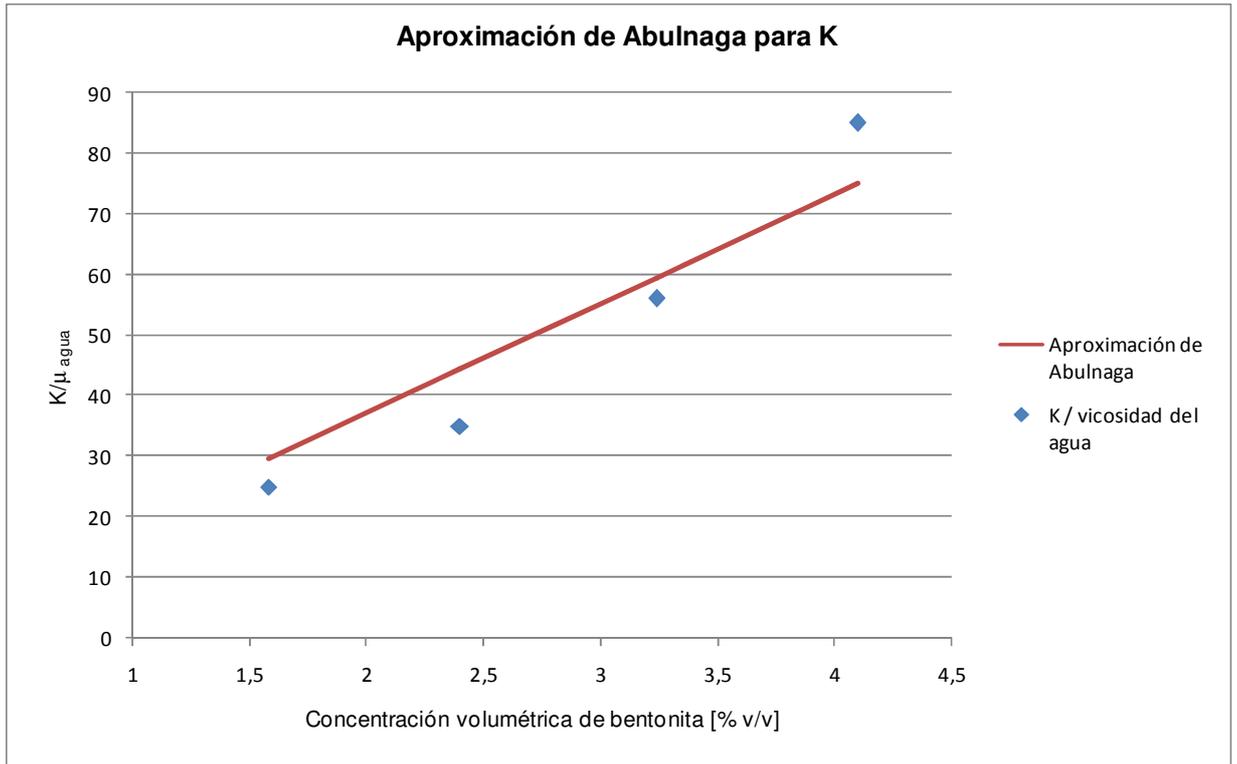


Figura 6.9: Correlación de Abulnaga

El valor de K_1 domina sobre los otros términos, por lo que la aproximación cuadrática-exponencial da como resultado una curva casi completamente lineal.

6.4. Utilidad de los Lodos Bentoníticos para Simular Pastas de Relaves

Las principales razones para no utilizar pastas de relaves reales en este trabajo de memoria de título, son la dificultad para obtenerlas, además de que poseen una reología variable en el tiempo, debido a productos químicos que les suelen ser añadidos (como polímeros o coagulantes). La cuestión que debe analizarse es si los lodos bentoníticos son adecuados para simular pastas de relaves.

Las pastas de relaves poseen esfuerzo de fluencia, y su reología puede ser retratada con la ley de potencia ($\tau = \tau_f + K\dot{\gamma}^n$), pudiendo presentar un comportamientoseudoplástico, dilatante, o de plástico de Bingham.

Los resultados del presente capítulo concluyen que la reología de los lodos bentoníticos sigue la ley de potencia con $n=1$ (plástico de Bingham). Además, los efectos del esfuerzo de fluencia en los lodos bentoníticos son mucho mayores que los efectos viscosos (retratados por el coeficiente de consistencia K), por lo que es esperable que la experimentación dé resultados que confirmen que las características de los flujos dependen mucho más de los valores de τ_f que de los valores de K .

Es por esto que se puede asegurar que los resultados obtenidos de la experimentación con lodos bentoníticos pueden arrojar resultados representativos de flujos de pastas de relaves influenciados principalmente por los esfuerzos de fluencia. Por el contrario, estos experimentos no son representativos para pastas que poseen una reología influida principalmente por los esfuerzos viscosos, representados por los parámetros K y n .

6.5. Errores de Medición

Para estimar los errores experimentales, se calcula la desviación estándar de los datos del esfuerzo de corte, en cada experimento y en cada punto, y posteriormente se toma el mayor valor de σ^2 como una estimación del error en la determinación el esfuerzo de fluencia, para cada lodo experimentado.

Tabla 6.3: Estimaciones de errores en la determinación de τ_f

Concentración del Lodo	Error asociado a τ_f
[% p/p]	[Pa]
4	0,3
6	0,5
8	0,6
10	0,6

Estos valores fueron añadidos como barras de error en la figura 6.7.

7. Resultados

7.1. Codificación de Experimentos

Con objeto de facilitar la visualización de los resultados, a cada uno de los experimentos se le asigna un código que indica la concentración de bentonita la inclinación del plano y el caudal vertido. El código comienza con la letra ‘E’, luego de la letra ‘c’ se indica el porcentaje en peso de bentonita del lodo, luego de la letra ‘i’ se indica la pendiente del plano, en porcentaje, y luego de la letra ‘q’ se indica el caudal descargado en ml/s.

Por ejemplo el experimento E-c4-i35-q144 fue efectuado con un lodo con una concentración de bentonita del 4% en peso, sobre un plano con una pendiente de inclinación del 35%, y con un caudal de 144 ml/s.

7.2. Resultados Generales

Los resultados obtenidos en cada experimento se detallan en el Anexo 1.

Estabilidad de Escurrimientos

A continuación se clasifican los experimentos en estables o inestables, según la observación de ondas rodantes en cada experimento. Además, se muestran los resultados de aplicar el criterio de inestabilidad de flujos descrito en Coussot (1997), indicado en la expresión (5.2), para cada experimento, y cuantificado en el número adimensional A , definido en la ecuación (5.3), y que se calcula para todos los experimentos:

Tabla 7.1: Estabilidad de Escurrimientos

Experimento	Tipo de Escurrimiento Observado	A	Experimento	Tipo de Escurrimiento Observado	A	Experimento	Tipo de Escurrimiento Observado	A
E-c6-i35-q093	INESTABLE	1,27	E-c6-i65-q138	INESTABLE	0,64	E-c10-i20-q118	ESTABLE	22,94
E-c6-i35-q131	INESTABLE	0,68	E-c6-i65-q112	INESTABLE	0,57	E-c10-i20-q088	ESTABLE	34,26
E-c8-i50-q045	INESTABLE	1,20	E-c6-i65-q093	INESTABLE	0,51	E-c10-i20-q062	ESTABLE	48,93
E-c8-i50-q061	INESTABLE	0,58	E-c6-i65-q062	INESTABLE	0,54	E-c10-i20-q040	ESTABLE	89,46
E-c8-i50-q091	INESTABLE	1,16	E-c6-i65-q046	INESTABLE	0,54	E-c10-i20-q020	ESTABLE	230,15
E-c8-i50-q122	INESTABLE	0,81	E-c9-i65-q133	INESTABLE	0,99	E-c6-i20-q053	ESTABLE	4,13
E-c10-i65-q056	INESTABLE	1,61	E-c9-i65-q095	INESTABLE	0,72	E-c6-i20-q035	ESTABLE	4,31
E-c10-i65-q123	INESTABLE	1,24	E-c9-i65-q054	INESTABLE	1,07	E-c8-i20-q117	ESTABLE	8,27
E-c4-i50-q096	INESTABLE	0,79	E-c6-i20-q115	INESTABLE	0,80	E-c8-i20-q086	ESTABLE	6,87
E-c4-i50-q079	INESTABLE	0,61	E-c6-i20-q081	INESTABLE	1,02	E-c8-i20-q060	ESTABLE	13,34
E-c4-i50-q042	INESTABLE	0,49	E-c8-i65-q127	INESTABLE	0,54	E-c8-i20-q043	ESTABLE	18,47
E-c4-i50-q020	INESTABLE	0,72	E-c8-i65-q103	INESTABLE	0,52	E-c9-i35-q098	ESTABLE	2,31
E-c4-i35-q144	INESTABLE	0,48	E-c8-i65-q074	INESTABLE	0,58	E-c9-i35-q085	ESTABLE	2,55
E-c4-i35-q091	INESTABLE	0,50	E-c8-i65-q045	INESTABLE	0,66	E-c9-i35-q057	ESTABLE	3,19
E-c4-i35-q069	INESTABLE	0,61	E-c9-i50-q036	INESTABLE	1,04	E-c9-i35-q039	ESTABLE	5,20
E-c4-i35-q044	INESTABLE	0,95	E-c10-i65-q030	ESTABLE	8,24	E-c9-i50-q103	ESTABLE	2,84
E-c4-i65-q126	INESTABLE	0,66	E-c10-i65-q084	ESTABLE	4,67	E-c9-i50-q081	ESTABLE	2,46
E-c4-i65-q089	INESTABLE	0,66	E-c6-i35-q054	ESTABLE	4,73	E-c9-i50-q064	ESTABLE	2,47
E-c4-i65-q058	INESTABLE	0,79	E-c6-i35-q031	ESTABLE	10,69	E-c10-i50-q111	ESTABLE	3,40
E-c4-i65-q033	INESTABLE	0,85	E-c9-i65-q029	ESTABLE	9,67	E-c10-i35-q114	ESTABLE	4,10
E-c4-i20-q116	INESTABLE	0,57	E-c9-i20-q118	ESTABLE	19,13	E-c10-i50-q060	ESTABLE	5,43
E-c4-i20-q091	INESTABLE	0,50	E-c9-i20-q086	ESTABLE	26,20	E-c10-i50-q037	ESTABLE	6,66
E-c4-i20-q059	INESTABLE	0,50	E-c9-i20-q054	ESTABLE	45,17	E-c10-i35-q114	ESTABLE	6,03
E-c4-i20-q035	INESTABLE	0,76	E-c9-i20-q021	ESTABLE	109,45	E-c10-i35-q086	ESTABLE	11,60
E-c6-i50-q112	INESTABLE	0,40	E-c8-i35-q114	ESTABLE	8,37	E-c10-i35-q062	ESTABLE	9,10
E-c6-i50-q083	INESTABLE	0,43	E-c8-i35-q081	ESTABLE	7,59	E-c10-i35-q038	ESTABLE	17,79
E-c6-i50-q054	INESTABLE	0,47	E-c8-i35-q058	ESTABLE	9,12			
E-c6-i50-q032	INESTABLE	1,03	E-c8-i35-q040	ESTABLE	11,60			

Se resaltan los resultados que no cumplen con el criterio de inestabilidad mencionado.

Se observan 9 casos de escurrimientos que no cumplen con el criterio (todos inestables). Los restantes 73 sí cumplen. De los 9 flujos que no satisfacen el límite de inestabilidad, tan sólo 5 muestran valores del número A mayores que 1,1.

Relación de los números adimensionales de Reynolds y Froude

A continuación se muestra el gráfico de los números adimensionales $\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta}$ v/s Re_{eq} , en escala log-log, para facilitar su visualización:

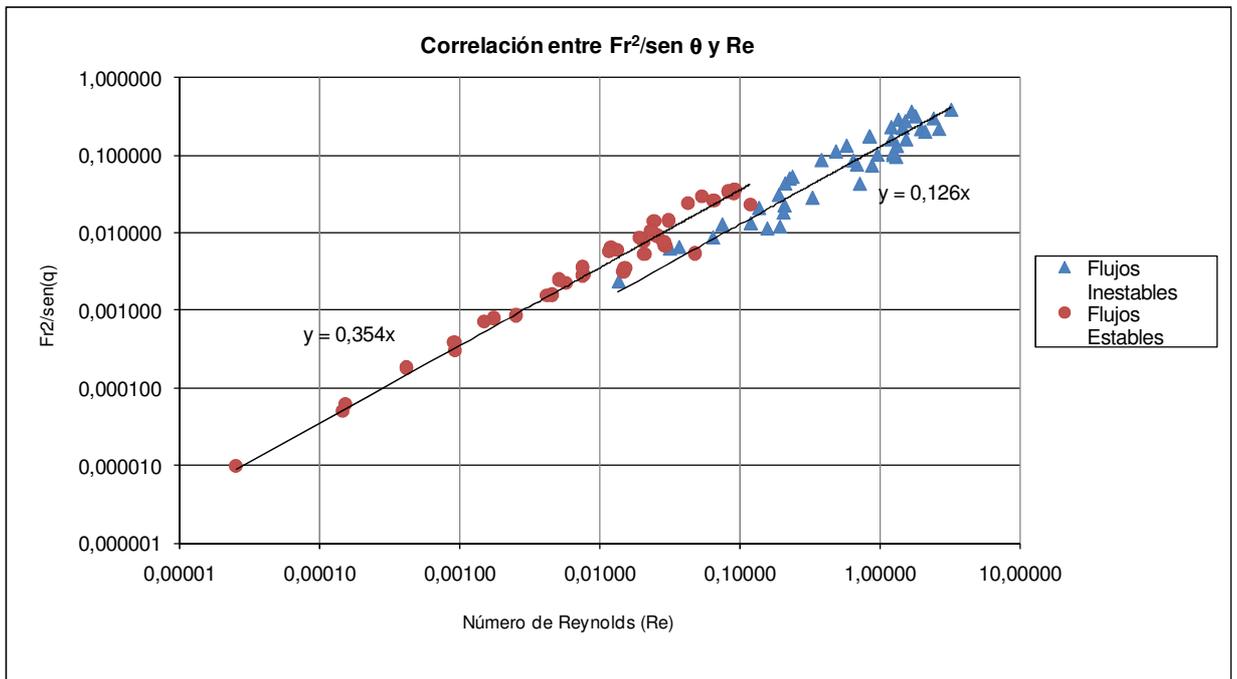


Figura 7.1: Gráfico de correlación entre $\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta}$ y Re_{EQ} , para los escurrimientos estables e inestables

Para ambos tipos de flujos, se ha trazado una línea de tendencia que pasa por el origen. Esto origina las siguientes relaciones:

Flujos estables: $\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta} = 0,354 \cdot Re$

Flujos inestables: $\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta} = 0,126 \cdot Re$

7.3. Flujos sin Ondas Rodantes

A continuación se muestra la relación entre el ancho alcanzado por los flujos estables (sin la aparición de ondas rodantes), y la altura promedio (h) dividida por el seno del ángulo de inclinación:

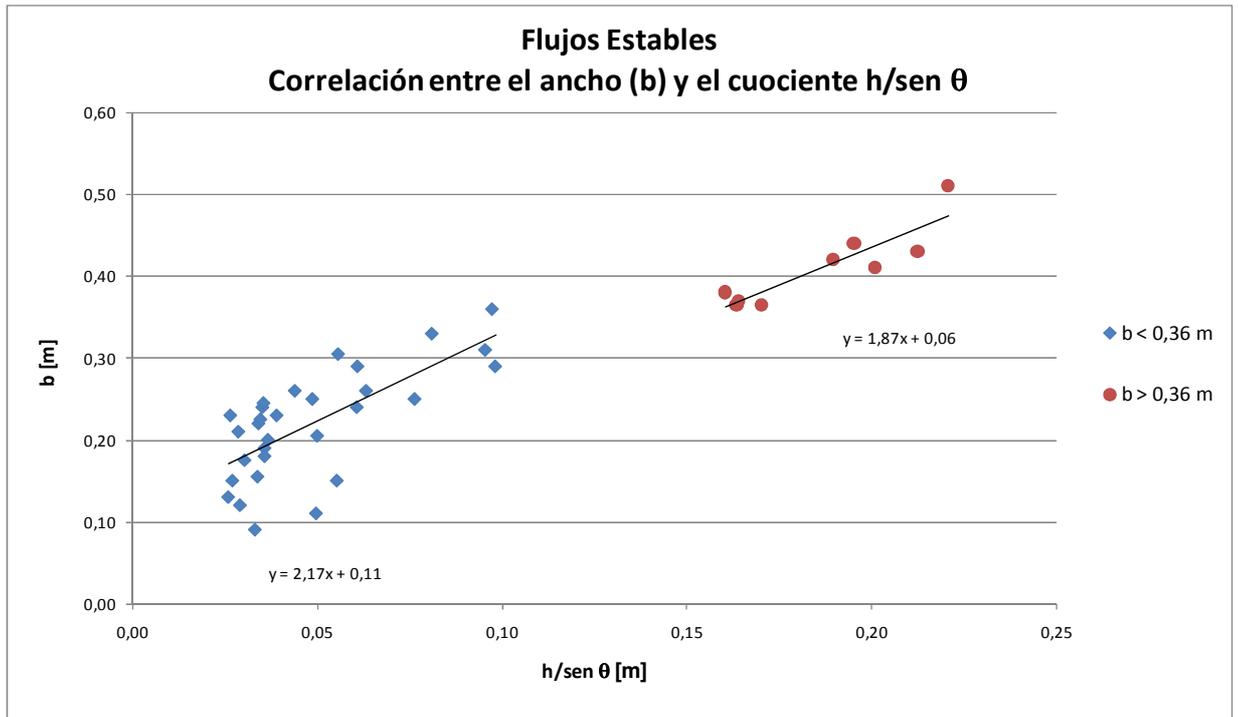


Figura 7.2: Correlación entre b , y el cociente $\frac{h}{\text{sen } \theta}$ para los escurrimientos estables

En el gráfico se aprecia que hay dos tendencias claramente separadas, por una parte, los experimentos que cumplen con $b < 0,36 \text{ m}$ siguen una tendencia que señala la siguiente relación para las variables involucradas:

$$b = 2,17 \frac{h}{\text{sen } \theta} + 0,11 \rightarrow 0,46 b = \frac{h}{\text{sen } \theta} + 0,05$$

Mientras que para el conjunto de experimentos de ancho $b > 0,36 \text{ m}$, se tiene la siguiente relación:

$$b = 1,87 \frac{h}{\text{sen } \theta} + 0,06 \rightarrow 0,53 b = \frac{h}{\text{sen } \theta} + 0,03$$

Ambas expresiones se asemejan en forma a la ecuación (5.12), excepto por la presencia de una constante en cada una de las ecuaciones, la cual seguramente proviene de los efectos de tensión superficial. El valor del factor que acompaña al ancho, se diferencia

del valor teórico para los escurrimientos newtonianos ($\alpha = \frac{1}{3}$), debido a la existencia de un esfuerzo de fluencia.

Dado el error inherente a las mediciones de la altura, se realiza un análisis con un número adimensional que no dependa de dicha magnitud. Es por esto que se calcula el número adimensional (5.13), para los flujos estables que cumplan con la condición $K \ll \frac{\tau_f b h^2}{Q}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 7.2: Cálculo del Número Adimensional $\frac{\tau_f}{b\gamma \text{sen}^2 \theta}$

Experimento	Cte.	Experimento	Cte.	Experimento	Cte.	Experimento	Cte.	Experimento	Cte.
E-c6-i35-q031	0,052	E-c8-i35-q081	0,053	E-c9-i35-q057	0,091	E-c10-i20-q062	0,197	E-c10-i50-q037	0,107
E-c8-i20-q043	0,129	E-c8-i35-q114	0,043	E-c9-i35-q085	0,083	E-c10-i20-q088	0,211	E-c10-i50-q060	0,092
E-c8-i20-q060	0,121	E-c9-i20-q021	0,154	E-c9-i35-q098	0,082	E-c10-i20-q118	0,206	E-c10-i50-q084	0,088
E-c8-i20-q086	0,113	E-c9-i20-q054	0,156	E-c9-i50-q103	0,048	E-c10-i35-q038	0,117	E-c10-i50-q111	0,074
E-c8-i20-q117	0,104	E-c9-i20-q086	0,156	E-c9-i65-q029	0,082	E-c10-i35-q062	0,127	E-c10-i65-q030	0,093
E-c8-i35-q040	0,088	E-c9-i20-q118	0,150	E-c10-i20-q020	0,170	E-c10-i35-q086	0,122	E-c10-i65-q084	0,064
E-c8-i35-q058	0,064	E-c9-i35-q039	0,100	E-c10-i20-q040	0,201	E-c10-i35-q114	0,105		

Promedio: 0,113; Desviación Estándar: 0,047

El valor teórico de este número adimensional es $\alpha^2 = 0,111$, para fluidos newtonianos.

Los experimentos que no cumplen con la condición $K \ll \frac{\tau_f b h^2}{Q}$ fueron 5, de un total de 39.

7.4. Flujos Inestables

Los flujos inestables, al presentar ondas rodantes, poseen varias alturas características:

h_{max} : Altura máxima que alcanzan las ondas rodantes, o amplitud de las ondas.

h_{min} : Altura mínima alcanzada por el escurrimiento, entre las ondas rodantes.

h_{med} : Altura promediada espacialmente, a lo largo de todo el perfil longitudinal medido. Esta altura media es la altura utilizada para los cálculos del subcapítulo 7.2.

Todas estas alturas son determinadas a partir de los perfiles medidos en la parte baja del plano, según la metodología expuesta en el subcapítulo 4.3.

A continuación se grafican los valores de $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ y $\frac{h_{min}}{h_{med}}$, versus el número de Froude:

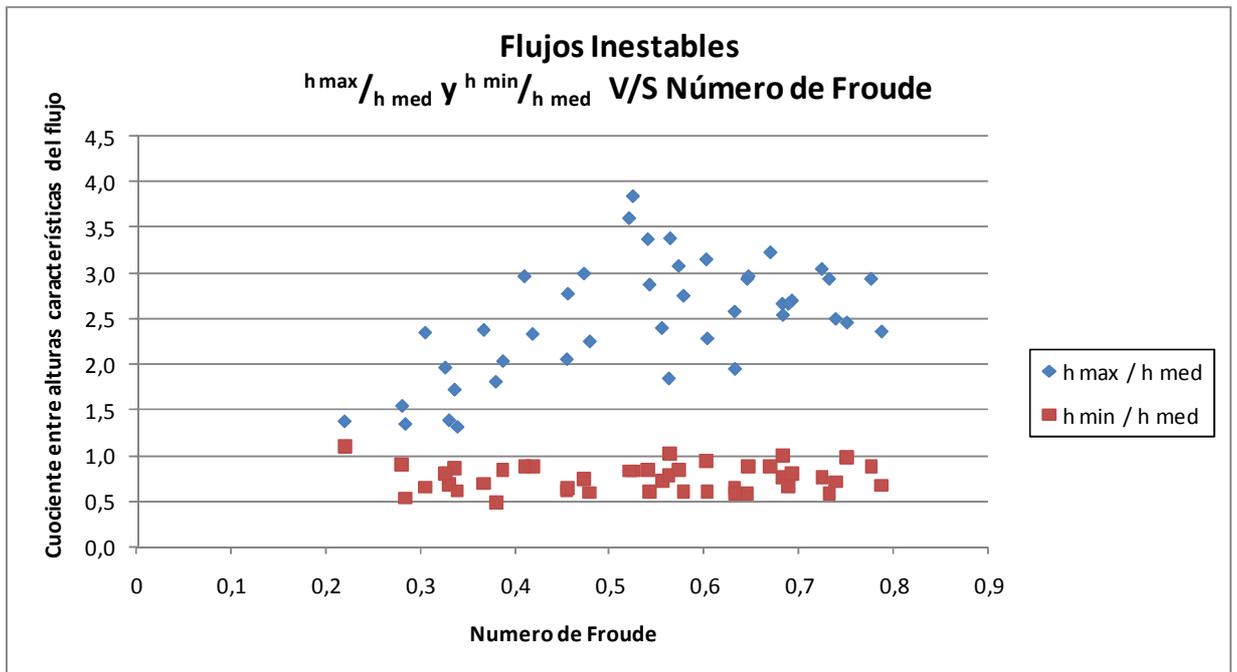


Figura 7.3: Gráfico de $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ y $\frac{h_{min}}{h_{med}}$ v/s Fr para los escurrimientos inestables

Se observa una tendencia del cociente $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ de aumentar con el número Fr , hasta valores de $Fr \sim 0,6$, mientras que a partir de dicho valor tiende a mantenerse constante. En tanto los valores del cociente $\frac{h_{min}}{h_{med}}$ manifiestan una tendencia a permanecer constantes entre

$$\frac{h_{min}}{h_{med}} = 0,5 \text{ y } \frac{h_{min}}{h_{med}} = 1.$$

A continuación se grafica el cociente $\frac{h_{max}}{h_{med}}$, versus el número de Montuori, M , que retrata la relación entre los esfuerzos inerciales del escurrimiento, y la componente gravitacional de la fuerza.

El número de Montuori es calculado con la expresión:

$$M^2 = \frac{U^2}{gL \sin \theta}$$

Hay que recordar que las alturas de las ondas fueron medidas en la parte final del plano de escurrimiento, por lo que el número M ha sido calculado con la distancia L entre la descarga del fluido, y el final del plano.

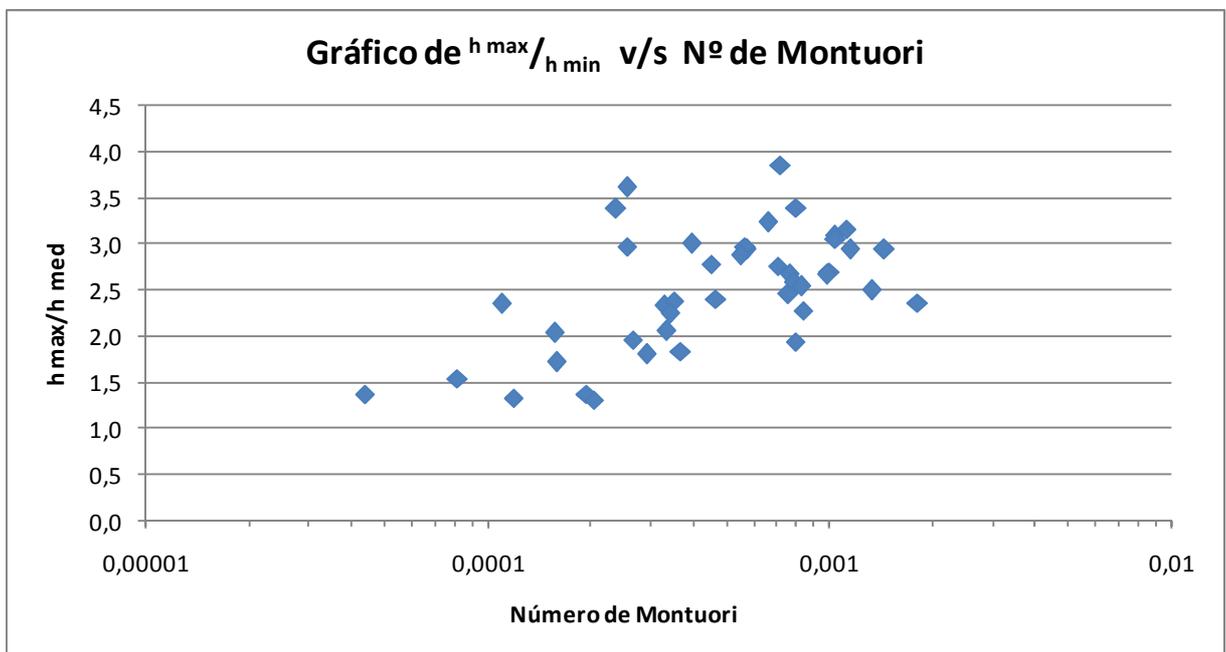


Figura 7.4: Gráfico de $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ v/s el Número de Montuori, para los escurrimientos inestables

Los puntos muestran una tendencia a aumentar con el número de Montuori, pero para valores de M mayores que 0,0003 la dispersión de los puntos es grande, impidiendo observar una tendencia más clara.

El valor del número de Montuori debe ser calculado con la distancia que existe entre la descarga y la sección en que se forman las ondas rodantes. Este valor es menor que el valor de L utilizado en el presente cálculo (la distancia entre la descarga y el punto de medición de las alturas), debido a que no se midió el punto de formación de ondas rodantes.

7.5. Errores de Medición

Para estimar el error en la medición de h , se deben tener en cuenta las características de todos los elementos que forman parte del sistema de medición. Estos son los rayos láser, el plano inclinado, las cámaras, y el software MATLAB utilizado para procesar las imágenes.

Los ángulos que se forman entre los rayos láser, las cámaras y el plano inclinado, deben ser medidos con un transportador. Por lo tanto los ángulos medidos tienen un error asociado. Por otra parte, las líneas formadas por los rayos láser tienen un determinado grosor, el cual causa un error en la lectura de las imágenes por parte del software MATLAB.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de h son:

$$\text{Perfil Longitudinal: } h = \frac{d_{AB} \tan(\theta_L)}{\sin(\theta_C)}$$

$$\text{Perfil Transversal: } h = \frac{d_{AB} \tan(\theta_L - \theta)}{\sin(\theta + \theta_C)}$$

El valor del desplazamiento d_{AB} , tiene un error asociado al grosor de la línea, que según las observaciones realizadas, es de aproximadamente un 20% de la altura del escurrimiento.

Los ángulos tienen un error debido a las mediciones. Los valores de alturas de los perfiles transversales tienen el doble de error que los valores de alturas de los perfiles longitudinales, debido a la suma y resta de ángulos realizada dentro de las funciones.

Ante la indisponibilidad del valor del error asociado a los ángulos, y ante la información disponible, se trabaja de preferencia con las alturas determinadas en las mediciones de perfiles longitudinales, por ser ellas las de menor error asociado.

Por otra parte, la determinación del ancho máximo a través de una fotografía del flujo sobre una cuadrícula dibujada, tiene un error asociado a la distancia entre líneas y a la resolución de las fotografías. Debido a la naturaleza de la cuadrícula (con separaciones de 5 cm) y de las fotografías (de 10 mega píxeles) podemos estimar el error de la medición de b en 1 cm.

8. Conclusiones y Comentarios

8.1. Resultados Generales

Los resultados obtenidos del experimento de caracterización reológica muestran unos lodos bentoníticos con un comportamiento típico de un plástico de Bingham, con un esfuerzo de fluencia bien definido y una ley de potencia con $n=1$.

La estabilidad de los flujos cumplió a cabalidad el criterio expuesto por Coussot (1997), y retratado en las ecuaciones (5.2) y (5.4).

8.2. Flujos Estables

Las relaciones obtenidas con los resultados de los flujos estables, tienen mayor representatividad en cuanto a las mediciones de la altura y los números adimensionales que dependen de dicha magnitud, puesto que los flujos inestables tienen una distorsión en el valor de su altura de escurrimiento, debido a la existencia de ondas rodantes.

En general los resultados obtenidos de los experimentos, manifiestan un comportamiento esperable. Esto se ve con claridad en las relaciones de los valores de los números adimensionales de Reynolds y de Froude, específicamente en la tendencia del gráfico de $\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta}$ v/s Re , que denota una relación ($\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta} = 0,354 \cdot Re$) parecida a la que se deduce de la ecuación de Navier-Stokes para escurrimientos permanentes bi-dimensionales de fluidos newtonianos ($\frac{Fr^2}{\text{sen } \theta} = \alpha Re$, con $\alpha = 1/3$). Esto seguramente debido a que el parámetro definido como viscosidad cinemática equivalente, es una buena aproximación para calcular el número de Reynolds.

El gráfico de correlación entre b y $\frac{h}{\text{sen } \theta}$, experimenta una alta dispersión, producida por los errores en las mediciones de h . Además, muestra dos grupos de puntos claramente separados, en $b = 0,36$ m. Ambos conjuntos de datos muestran tendencias lineales del tipo $C_1 \frac{h}{\text{sen } \theta} = C_2 + b$, en donde C_1 es cercano a 0,5. La existencia de C_2 es producto de los efectos de tensión superficial y la dispersión de los datos. La separación de los datos a partir de $b = 0,36$ m, indica la existencia de un efecto adicional sobre el escurrimiento que comienza a actuar en dicho umbral.

El resultado obtenido al evaluar la expresión adimensional $\frac{\tau_f}{b \cdot \gamma \cdot \text{sen}^2 \theta}$, mostró, en promedio, un valor de $\frac{\tau_f}{b \cdot \gamma \cdot \text{sen}^2 \theta} = 0,113$, con una desviación estándar de 0,047. Esta desviación está dada por las variaciones de caudal entre los distintos experimentos, que modifican el valor de b . El valor de $\alpha^2 = 0,113$, se aproxima mucho al valor teórico de dicha constante para fluidos newtonianos: $\alpha^2 = 0,111$.

8.3. Flujos Inestables

Para caracterizar los flujos inestables, se utilizan los números adimensionales $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ y $\frac{h_{min}}{h_{med}}$, ya que simbolizan la magnitud de la inestabilidad alcanzada por el escurrimiento. En el gráfico de ambos adimensionales versus el número de Froude, se ve que los valores de $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ muestran una tendencia a aumentar con los valores del número de Froude hasta $Fr \sim 0,6$, y para valores mayores de Fr el cociente $\frac{h_{max}}{h_{med}}$ exhibe un comportamiento constante. Mientras que los valores de $\frac{h_{min}}{h_{med}}$ muestran una independencia del número de Froude. Si se grafican ambos números adimensionales versus el Reynolds, se obtienen resultados similares, debido a la proporcionalidad encontrada anteriormente entre los valores de $\frac{Fr^2}{\sin \theta}$ y Re .

Al calcular el número de Montuori, para los escurrimientos inestables, se nota una clara tendencia del número adimensional $\frac{h_{max}}{h_{medio}}$ a aumentar, a medida que aumenta el valor de M . Esto muestra que la inestabilidad se manifiesta con ondas de amplitud relativa más alta, cuando los esfuerzos inerciales son proporcionalmente mayores que los gravitacionales.

Es importante notar que todas las alturas obtenidas fueron medidas en la misma sección del plano para todos los escurrimientos. Esta condición limita el análisis, al no conocer los distintos largos en donde aparecen las ondas rodantes en cada flujo particular, ni la variación de las ondas rodantes a medida que circulan a lo largo del plano inclinado.

Finalmente, no hay que olvidar que los errores de las mediciones de las alturas medias tienen un error que puede alcanzar un porcentaje sobre el 20% (valor dado sólo por el ancho de la línea láser), ya que estas alturas en algunos casos tienen magnitudes del orden de milímetros. Esto ha provocado que el análisis carezca de datos de precisión aceptable en ciertos rangos de valores de alturas.

8.4. Aplicaciones a Pastas de Relaves Reales.

El comportamiento mostrado por los lodos durante la presente experimentación, puede ser llevado a escalas grandes a través de los números adimensionales calculados.

Las pastas de relaves, si bien tienen comportamientos reológicos más complejos que los lodos bentoníticos, pueden ser modeladas a partir de sus propiedades intensivas como el esfuerzo de fluencia, la densidad, el coeficiente de consistencia, de forma de poder modelar su comportamiento en flujos en pendientes de ancho muy grande.

A modo de ejemplo, un tranques de relaves en pendiente, presenta las características físicas necesarias para que ocurra un flujo como los analizados en el presente trabajo, como se esquematiza a continuación:

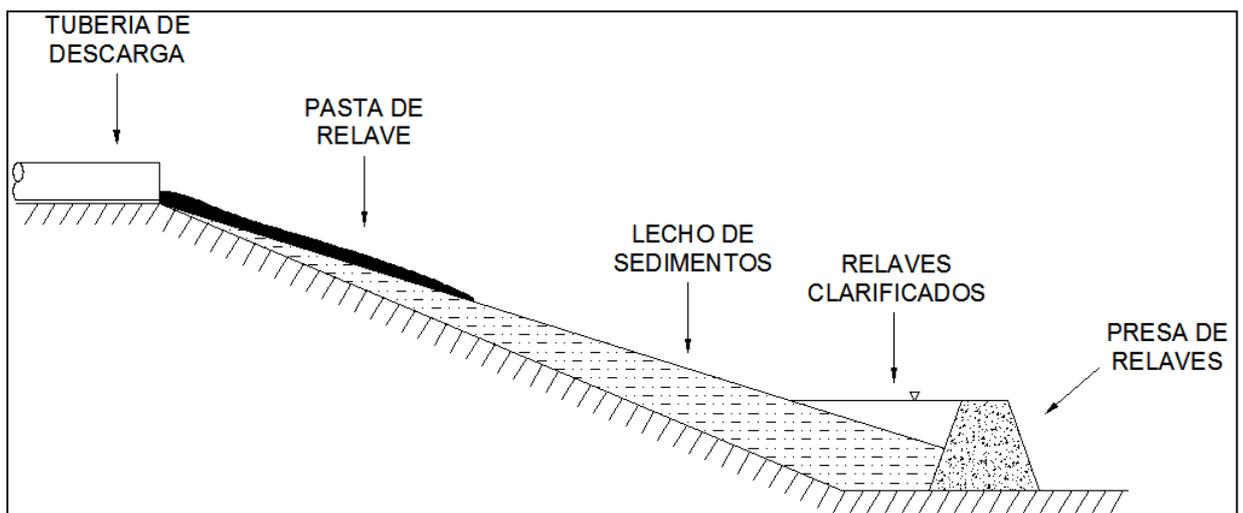


Figura 8.1: Esquema de un tranque de relaves

En este caso, se tendría una descarga definida, con los valores de Q , i , τ , K , ρ , conocidos, por lo que se pueden determinar los valores de h y b , además de establecer si el flujo será estable, o bien inestable, con la consecuente aparición de ondas rodantes.

9. Referencias Bibliográficas

- 1) ALDERMAN, N.J. & HALDENWANG, R. (2007) "A review of Newtonian and non-Newtonian flow in rectangular open channels". *Hydrotransport 17. The 17th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy and the BHR Group.
- 2) WHIPPLE, K. (1997) "Open-Channel Flow of Bingham Fluids: Applications in Debris-Flow Research". *The Journal of Geology*, volume 105, p.243-262.
- 3) CHANSON, H., JARNY, S., TOCQUER, L., & COUSSOT, P. (2004) "An Experimental Study of Sudden Release of Bentonite Suspensions down an Inclined Chute". *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, The University of Sydney, Sydney, Australia, 13-17 Diciembre 2004.
- 4) HUANG, X., & GARCIA, H. (1997) "A Perturbation Solution for Bingham-Plastic Mudflows". *Journal of Hydraulic Engineering*, Nov 1997, p. 986-994.
- 5) COUSSOT, P. (1994) "Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel". *Journal of Hydraulic Research*, vol. 32, N°4, p.535-559.
- 6) TROWBRIDGE, J.H. (1987) "Instability of concentrated free surface flows", *Journal of Geophysical Research*, 92 (C9), p. 9523-9530.
- 7) MONTSERRAT, S., TAMBURRINO, A., NIÑO, Y. (2005) "Estudio experimental de la presencia de barreras en flujos detríticos". *Ingeniería del Agua*, Vol. 12, N° 3, pp. 217-229.
- 8) ABULNAGA, B. "Slurry Systems Handbook". USA. Mc Graw-Hill 2002. p. 1.22

ANEXO 1

RESULTADOS EXPERIMENTOS

A continuación se muestran los resultados de los experimentos medidos directamente:

C=	q1	0,0942 l/s	C=	q1	0,0809 l/s	C=	q1	0,0426 l/s	C=	q1	0,0201 l/s
	t	9,5 s		t	11,43 s		t	19 s		t	31,37 s
	v	0,895 l		v	0,925 l		v	0,81 l		v	0,63 l
4%	q2	0,0975 l/s	4%	q2	0,0774 l/s	4%	q2	0,0421 l/s	4%	q2	0,0198 l/s
	t	4,72 s		t	9,56 s		t	14,72 s		t	28,54 s
	v	0,46 l		v	0,74 l		v	0,62 l		v	0,565 l
i=	q3	0,0964 l/s	i=	q3	0,0804 l/s	i=	q3	0,0411 l/s	i=	q3	0,0201 l/s
	t	9,54 s		t	12,13 s		t	21,75 s		t	16,66 s
	v	0,92 l		v	0,975 l		v	0,895 l		v	0,335 l
50%	q	0,096 l/s	50%	q	0,080 l/s	50%	q	0,042 l/s	50%	q	0,020 l/s
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido	
	b	37 cm		b	33 cm		b	26 cm		b	19 cm

C=	q1	0,1124 l/s	C=	q1	0,0821 l/s	C=	q1	0,0547 l/s	C=	q1	0,0323 l/s
	t	8,63 s		t	10,53 s		t	16,53 s		t	28,75 s
	v	0,97 l		v	0,865 l		v	0,905 l		v	0,93 l
6%	q2	0,1121 l/s	6%	q2	0,0826 l/s	6%	q2	0,0535 l/s	6%	q2	0,0324 l/s
	t	8,16 s		t	8,53 s		t	10,75 s		t	15,41 s
	v	0,915 l		v	0,705 l		v	0,575 l		v	0,5 l
i=	q3	0,1122 l/s	i=	q3	0,0842 l/s	i=	q3	0,0535 l/s	i=	q3	0,032 l/s
	t	7,4 s		t	6,06 s		t	13,75 s		t	20,91 s
	v	0,83 l		v	0,51 l		v	0,735 l		v	0,67 l
50%	q	0,112 l/s	50%	q	0,083 l/s	50%	q	0,054 l/s	50%	q	0,032 l/s
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido	
	b	30 cm		b	25 cm		b	16 cm		b	15 cm

C=	q1	0,1326 l/s	C=	q1	0,0538 l/s	C=	q1	0,0924 l/s	C=	q1	0,0314 l/s
	t	4,94 s		t	17,84 s		t	9,74 s		t	30,39 s
	v	0,655 l		v	0,96 l		v	0,9 l		v	0,955 l
6%	q2	0,1302 l/s	6%	q2	0,055 l/s	6%	q2	0,093 l/s	6%	q2	0,0309 l/s
	t	6,53 s		t	17,28 s		t	10,43 s		t	24,56 s
	v	0,85 l		v	0,95 l		v	0,97 l		v	0,76 l
i=	q3	0,1298 l/s	i=	q3	0,0541 l/s	i=	q3	0,0938 l/s	i=	q3	0,0315 l/s
	t	7,28 s		t	14,41 s		t	8,69 s		t	19,68 s
	v	0,945 l		v	0,78 l		v	0,815 l		v	0,62 l
35%	q	0,131 l/s	35%	q	0,054 l/s	35%	q	0,093 l/s	35%	q	0,031 l/s
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido	
	b	33 cm		b	21 cm		b	26,5 cm		b	11 cm

C=	q1 0,0438 l/s t 10,85 s v 0,475 l	C=	q1 0,0919 l/s t 10,56 s v 0,97 l	C=	q1 0,1434 l/s t 6,31 s v 0,905 l	C=	q1 0,0699 l/s t 7,72 s v 0,54 l
4%	q2 0,0445 l/s t 18,41 s v 0,82 l	4%	q2 0,091 l/s t 10,27 s v 0,935 l	4%	q2 0,1456 l/s t 5,22 s v 0,76 l	4%	q2 0,0679 l/s t 10,24 s v 0,695 l
i=	q3 0,0441 l/s t 19,4 s v 0,855 l	i=	q3 0,0906 l/s t 10,21 s v 0,925 l	i=	q3 0,1443 l/s t 4,99 s v 0,72 l	i=	q3 0,0683 l/s t 12,3 s v 0,84 l
35%	q 0,044 l/s	35%	q 0,091 l/s	35%	q 0,144 l/s	35%	q 0,069 l/s
	ancho medido		ancho medido		ancho medido		ancho medido
	b 20 cm		b 36 cm		b 46 cm		b 32 cm

C=	q1 0,0794 l/s t 11,96 s v 0,95 l	C=	q1 0,0404 l/s t 24,24 s v 0,98 l	C=	q1 0,1148 l/s t 8,45 s v 0,97 l	C=	q1 0,0584 l/s t 9,93 s v 0,58 l
8%	q2 0,0818 l/s t 5,87 s v 0,48 l	8%	q2 0,0406 l/s t 19,83 s v 0,805 l	8%	q2 0,1128 l/s t 6,16 s v 0,695 l	8%	q2 0,0582 l/s t 14,08 s v 0,82 l
i=	q3 0,0806 l/s t 10,18 s v 0,82 l	i=	q3 0,0403 l/s t 16,37 s v 0,66 l	i=	q3 0,113 l/s t 6,37 s v 0,72 l	i=	q3 0,0581 l/s t 16,86 s v 0,98 l
35%	q 0,081 l/s	35%	q 0,040 l/s	35%	q 0,114 l/s	35%	q 0,058 l/s
	ancho medido		ancho medido		ancho medido		ancho medido
	b 25 cm		b 15 cm		b 30,5 cm		b 20,5 cm

C=	q1 0,1227 l/s t 4,89 s v 0,6 l	C=	q1 0,0904 l/s t 9,46 s v 0,855 l	C=	q1 0,0607 l/s t 13,52 s v 0,82 l	C=	q1 0,0447 l/s t 18,89 s v 0,845 l
8%	q2 0,1219 l/s t 5,99 s v 0,73 l	8%	q2 0,091 l/s t 10,77 s v 0,98 l	8%	q2 0,0616 l/s t 15,43 s v 0,95 l	8%	q2 0,0443 l/s t 16,59 s v 0,735 l
i=	q3 0,1215 l/s t 7,24 s v 0,88 l	i=	q3 0,0902 l/s t 9,65 s v 0,87 l	i=	q3 0,0605 l/s t 15,53 s v 0,94 l	i=	q3 0,045 l/s t 15,32 s v 0,69 l
50%	q 0,122 l/s	50%	q 0,091 l/s	50%	q 0,061 l/s	50%	q 0,045 l/s
	ancho medido		ancho medido		ancho medido		ancho medido
	b 26 cm		b 17 cm		b 16 cm		b 14 cm

C=	q1 0,0451 l/s t 21,28 s v 0,96 l	C=	q1 0,0728 l/s t 10,03 s v 0,73 l	C=	q1 0,1276 l/s t 7,84 s v 1 l	C=	q1 0,1024 l/s t 9,62 s v 0,985 l
8%	q2 0,0459 l/s t 18,1 s v 0,83 l	8%	q2 0,0743 l/s t 13,19 s v 0,98 l	8%	q2 0,1265 l/s t 5,69 s v 0,72 l	8%	q2 0,1039 l/s t 8,28 s v 0,86 l
i=	q3 0,0451 l/s t 18,19 s v 0,82 l	i=	q3 0,0737 l/s t 11,12 s v 0,82 l	i=	q3 0,1261 l/s t 7,06 s v 0,89 l	i=	q3 0,1035 l/s t 7,15 s v 0,74 l
65%	q 0,045 l/s	65%	q 0,074 l/s	65%	q 0,127 l/s	65%	q 0,103 l/s
	ancho medido		ancho medido		ancho medido		ancho medido
	b 11,5 cm		b 15 cm		b 23 cm		b 17 cm

C=	q1	0,0616 l/s	C=	q1	0,0453 l/s	C=	q1	0,112 l/s	C=	q1	0,0928 l/s	C=	q1	0,1376 l/s		
	t	9,91 s		t	21,28 s		t	8,57 s		t	9,81 s		t	4,87 s		
	v	0,61 l		v	0,965 l		v	0,96 l		v	0,91 l		v	0,67 l		
6%	q2	0,0625 l/s	6%	q2	0,0462 l/s	6%	q2	0,1117 l/s	6%	q2	0,0935 l/s	6%	q2	0,1381 l/s		
	t	12,97 s		t	17,97 s		t	8,15 s		t	9,63 s		t	6,88 s		
	v	0,81 l		v	0,83 l		v	0,91 l		v	0,9 l		v	0,95 l		
i=	q3	0,0614 l/s	i=	q3	0,0459 l/s	i=	q3	0,1127 l/s	i=	q3	0,0924 l/s	i=	q3	0,1369 l/s		
	t	14,91 s		t	16,87 s		t	7,5 s		t	10,93 s		t	6,5 s		
	v	0,915 l		v	0,775 l		v	0,845 l		v	1,01 l		v	0,89 l		
65%	q	0,062 l/s	65%	q	0,046 l/s	65%	q	0,112 l/s	65%	q	0,093 l/s	65%	q	0,138 l/s		
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido		ancho medido	
	b	24 cm		b	18 cm		b	25 cm		b	23 cm		b	30 cm		

C=	q1	0,0847 l/s	C=	q1	0,1227 l/s	C=	q1	0,0563 l/s	C=	q1	0,0305 l/s		
	t	10,75 s		t	8,31 s		t	17,15 s		t	24,56 s		
	v	0,91 l		v	1,02 l		v	0,965 l		v	0,75 l		
10%	q2	0,0847 l/s	10%	q2	0,1226 l/s	10%	q2	0,0555 l/s	10%	q2	0,0305 l/s		
	t	11,22 s		t	7,75 s		t	14,5 s		t	29,84 s		
	v	0,95 l		v	0,95 l		v	0,805 l		v	0,91 l		
i=	q3	0,084 l/s	i=	q3	0,1234 l/s	i=	q3	0,0562 l/s	i=	q3	0,0301 l/s		
	t	11,07 s		t	7,09 s		t	11,12 s		t	20,28 s		
	v	0,93 l		v	0,875 l		v	0,625 l		v	0,61 l		
65%	q	0,084 l/s	65%	q	0,123 l/s	65%	q	0,056 l/s	65%	q	0,030 l/s		
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido		ancho medido	
	b	17,5 cm		b	19 cm		b	14 cm		b	12 cm		

C=	q1	0,0954 l/s	C=	q1	0,0535 l/s	C=	q1	0,1326 l/s	C=	q1	0,028 l/s		
	t	10,06 s		t	17,56 s		t	4,75 s		t	27,16 s		
	v	0,96 l		v	0,94 l		v	0,63 l		v	0,76 l		
9%	q2	0,0961 l/s	9%	q2	0,0541 l/s	9%	q2	0,1332 l/s	9%	q2	0,0287 l/s		
	t	8,43 s		t	13,87 s		t	7,13 s		t	24,38 s		
	v	0,81 l		v	0,75 l		v	0,95 l		v	0,7 l		
i=	q3	0,0942 l/s	i=	q3	0,0532 l/s	i=	q3	0,1321 l/s	i=	q3	0,0289 l/s		
	t	10,09 s		t	17,75 s		t	7,42 s		t	23,84 s		
	v	0,95 l		v	0,945 l		v	0,98 l		v	0,69 l		
65%	q	0,095 l/s	65%	q	0,054 l/s	65%	q	0,133 l/s	65%	q	0,029 l/s		
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido		ancho medido	
	b	13 cm		b	10,5 cm		b	17 cm		b	9 cm		

C=	q1	0,1258 l/s	C=	q1	0,0896 l/s	C=	q1	0,0585 l/s	C=	q1	0,0336 l/s		
	t	4,93 s		t	9,82 s		t	14,28 s		t	19,93 s		
	v	0,62 l		v	0,88 l		v	0,835 l		v	0,67 l		
4%	q2	0,1262 l/s	4%	q2	0,0888 l/s	4%	q2	0,0577 l/s	4%	q2	0,0332 l/s		
	t	7,37 s		t	7,88 s		t	15,94 s		t	26,22 s		
	v	0,93 l		v	0,7 l		v	0,92 l		v	0,87 l		
i=	q3	0,1263 l/s	i=	q3	0,0893 l/s	i=	q3	0,0563 l/s	i=	q3	0,0328 l/s		
	t	4,67 s		t	6,72 s		t	10,03 s		t	28,93 s		
	v	0,59 l		v	0,6 l		v	0,565 l		v	0,95 l		
65%	q	0,126 l/s	65%	q	0,089 l/s	65%	q	0,058 l/s	65%	q	0,033 l/s		
	ancho medido			ancho medido			ancho medido			ancho medido		ancho medido	
	b	35 cm		b	32 cm		b	25 cm		b	18 cm		

C=	q1 0,0592 l/s t 15,72 s v 0,93 l	C=	q1 0,1163 l/s t 7,91 s v 0,92 l	C=	q1 0,091 l/s t 10 s v 0,91 l	C=	q1 0,0346 l/s t 13,59 s v 0,47 l
4%	q2 0,0592 l/s t 15,28 s v 0,905 l	4%	q2 0,1166 l/s t 8,06 s v 0,94 l	4%	q2 0,0919 l/s t 10,56 s v 0,97 l	4%	q2 0,0359 l/s t 23,69 s v 0,85 l
i=	q3 0,0591 l/s t 13,97 s v 0,825 l	i=	q3 0,1163 l/s t 8 s v 0,93 l	i=	q3 0,0916 l/s t 9,06 s v 0,83 l	i=	q3 0,0343 l/s t 27,41 s v 0,94 l
20%	q 0,059 l/s	20%	q 0,116 l/s	20%	q 0,091 l/s	20%	q 0,035 l/s
	ancho medido b 37 cm		ancho medido b 53 cm		ancho medido b 45 cm		ancho medido b 34 cm

C=	q1 0,1172 l/s t 8,53 s v 1 l	C=	q1 0,0881 l/s t 7,66 s v 0,675 l	C=	q1 0,0627 l/s t 9,97 s v 0,625 l	C=	q1 0,0397 l/s t 24,28 s v 0,965 l	C=	q1 0,025 l/s t 30,43 s v 0,76 l
10%	q2 0,1183 l/s t 7,69 s v 0,91 l	10%	q2 0,0881 l/s t 10,9 s v 0,96 l	10%	q2 0,0619 l/s t 15,82 s v 0,98 l	10%	q2 0,0401 l/s t 22,81 s v 0,915 l	10%	q2 0,0251 l/s t 31,87 s v 0,8 l
i=	q3 0,1184 l/s t 7,94 s v 0,94 l	i=	q3 0,0891 l/s t 11,06 s v 0,985 l	i=	q3 0,0615 l/s t 11,96 s v 0,735 l	i=	q3 0,0401 l/s t 16,47 s v 0,66 l	i=	q3 0,0253 l/s t 20,76 s v 0,525 l
20%	q 0,118 l/s	20%	q 0,088 l/s	20%	q 0,062 l/s	20%	q 0,040 l/s	20%	q 0,025 l/s
	ancho medido b 42 cm		ancho medido b 41 cm		65 ancho medido b 44 cm		ancho medido b 43 cm		ancho medido b 51 cm

C=	q1 0,1186 l/s t 7,25 s v 0,86 l	C=	q1 0,086 l/s t 11,16 s v 0,96 l	C=	q1 0,0537 l/s t 16,57 s v 0,89 l	C=	q1 0,0212 l/s t 30,22 s v 0,64 l
9%	q2 0,1174 l/s t 7,24 s v 0,85 l	9%	q2 0,0851 l/s t 10,28 s v 0,875 l	9%	q2 0,0546 l/s t 14 s v 0,765 l	9%	q2 0,0213 l/s t 40,13 s v 0,855 l
i=	q3 0,118 l/s t 7,84 s v 0,925 l	i=	q3 0,0862 l/s t 11,19 s v 0,965 l	i=	q3 0,0544 l/s t 13,5 s v 0,735 l	i=	q3 0,0213 l/s t 25,13 s v 0,535 l
20%	q 0,118 l/s	20%	q 0,086 l/s	20%	q 0,054 l/s	20%	q 0,021 l/s
	ancho medido b 38 cm		ancho medido b 36,5 cm		ancho medido b 36,5 cm		ancho medido b 37 cm

En las siguientes tablas se despliega la información de alturas calculadas con las mediciones de los perfiles transversales y longitudinales:

Experimentos	Perfil Transversal [cm]	Perfiles Longitudinales		
		Perfil 1 [cm]	Perfil 2 [cm]	Perfil 3 [cm]
E-c4-i20-q035	0,09	0,28	0,36	0,37
E-c4-i20-q059	0,15	0,29	-	0,3
E-c4-i20-q091	0,1	0,31	0,41	0,23
E-c4-i20-q116	0,12	0,34	0,42	0,31
E-c4-i35-q044	0,09	0,41	0,54	0,51
E-c4-i35-q069	0,1	0,3	0,29	0,34
E-c4-i35-q091	0,08	0,26	0,28	0,3
E-c4-i35-q144	0,12	0,24	0,27	0,38
E-c4-i50-q020	0,11	0,1	0,18	0,43
E-c4-i50-q042	0,26	0,17	0,22	0,22
E-c4-i50-q079	0,03	0,28	0,25	0,37
E-c4-i50-q096	0,03	0,37	0,33	0,55
E-c4-i65-q033	0,06	0,26	0,44	0,38
E-c4-i65-q058	0,05	0,39	0,42	0,33
E-c4-i65-q089	0,06	0,37	0,37	0,28
E-c4-i65-q126	0,07	0,43	0,41	0,34
E-c6-i20-q035	0,09	0,73	-	0,81
E-c6-i20-q053	0,97	0,84	0,89	0,87
E-c6-i20-q081	0,87	0,83	0,84	0,93
E-c6-i20-q115	0,7	0,71	-	0,72
E-c6-i35-q031	0,21	-	2,1	1,2
E-c6-i35-q054	0,24	0,9	1,01	-
E-c6-i35-q093	0,2	-	1	1,03
E-c6-i35-q131	0,15	0,52	0,7	0,57
E-c6-i50-q032	0,1	0,58	0,6	-
E-c6-i50-q054	0,2	-	0,38	0,36
E-c6-i50-q083	0,13	0,38	-	0,3
E-c6-i50-q112	0,12	0,4	0,38	0,24
E-c6-i65-q046	0,06	0,35	0,4	0,26
E-c6-i65-q062	0,06	0,38	0,34	0,3
E-c6-i65-q093	0,05	0,37	0,41	0,4
E-c6-i65-q112	0,06	0,47	0,49	0,39
E-c6-i65-q138	0,05	0,53	0,56	0,45
E-c8-i20-q043	1,95	1,8	2,15	1,84
E-c8-i20-q060	2,14	1,73	2,03	1,87
E-c8-i20-q086	2,26	1,81	2,11	0,86
E-c8-i20-q117	2,09	1,79	2,01	1,94
E-c8-i35-q040	0,19	-	1,76	1,91
E-c8-i35-q058	0,46	1,15	1,9	1,93
E-c8-i35-q081	0,45	1,33	1,84	1,68
E-c8-i35-q114	0,53	1,19	1,74	2,61

Experimentos	Perfil Transversal [cm]	Perfiles Longitudinales		
		Perfil 1 [cm]	Perfil 2 [cm]	Perfil 3 [cm]
E-c8-i50-q045	0,24	1,05	1,02	1,12
E-c8-i50-q061	0,15	0,6	0,9	0,5
E-c8-i50-q091	0,3	1,3	1,5	1,1
E-c8-i50-q122	0,4	0,6	1,3	0,8
E-c8-i65-q045	0,15	0,78	0,67	0,55
E-c8-i65-q074	0,15	0,47	0,82	0,69
E-c8-i65-q103	0,09	0,5	0,78	0,69
E-c8-i65-q127	0,1	0,73	0,62	0,61
E-c9-i20-q021	0,65	3,67	3,29	2,7
E-c9-i20-q054	0,57	3,45	3,48	3,09
E-c9-i20-q086	0,57	3,27	3,29	3,07
E-c9-i20-q118	0,54	3,17	3,16	3,12
E-c9-i35-q039	0,97	1,02	1,42	-
E-c9-i35-q057	0,93	0,97	1,3	-
E-c9-i35-q085	0,91	1,05	1,29	-
E-c9-i35-q098	0,98	1,06	1,3	-
E-c9-i50-q036	0,6	0,89	1,32	-
E-c9-i50-q064	0,59	1,1	1,24	-
E-c9-i50-q081	0,62	1,06	1,38	-
E-c9-i50-q103	0,57	1,08	1,31	-
E-c9-i65-q029	0,23	-	1,82	-
E-c9-i65-q054	0,25	1,33	1,23	-
E-c9-i65-q095	0,19	0,96	1,28	1
E-c9-i65-q133	0,25	1,32	1,69	1,31
E-c10-i20-q020	0,8	4,2	4,49	4,3
E-c10-i20-q040	0,75	4,1	4,38	4,03
E-c10-i20-q062	0,61	3,83	4,09	3,58
E-c10-i20-q088	0,61	4,08	4,12	3,63
E-c10-i20-q118	0,61	3,65	3,77	3,75
E-c10-i35-q038	1,47	2,43	2,18	1,68
E-c10-i35-q062	1,5	2,24	2,1	1,7
E-c10-i35-q086	1,58	2,37	2,69	-
E-c10-i35-q114	1,24	2,06	1,98	-
E-c10-i50-q037	0,62	1,41	1,64	-
E-c10-i50-q060	0,67	1,28	1,94	-
E-c10-i50-q084	0,69	1,33	1,89	-
E-c10-i50-q111	0,75	1,32	1,8	-
E-c10-i65-q030	0,4	-	1,4	1,8
E-c10-i65-q056	0,5	-	2,5	1,3
E-c10-i65-q084	0,4	1,3	2,2	1,5
E-c10-i65-q123	0,4	1,9	2,2	1,5

A continuación se muestran todas las características de los escurrimientos:

Magnitud	C	i	Q	θ	b	τ_f	K	ρ	h	Re	Fr^z	Presencia de Ondas Rodantes
Unidad	[%]	-	[m ³ /s]	[°]	[m]	[kg/m*s2]	[kg/m*s]	[kg/m3]	[m]	-	-	
E-c4-i20-q035	4%	20%	3,5E-05	11,3	0,34	2,8	0,02	1064	0,003	0,329	0,028	SI
E-c4-i20-q059	4%	20%	5,9E-05	11,3	0,37	2,8	0,02	1064	0,003	0,957	0,101	SI
E-c4-i20-q091	4%	20%	9,1E-05	11,3	0,45	2,8	0,02	1064	0,003	1,318	0,131	SI
E-c4-i20-q116	4%	20%	1,2E-04	11,3	0,53	2,8	0,02	1064	0,004	1,244	0,108	SI
E-c4-i35-q044	4%	35%	4,4E-05	19,3	0,20	2,8	0,02	1064	0,005	0,718	0,043	SI
E-c4-i35-q069	4%	35%	6,9E-05	19,3	0,32	2,8	0,02	1064	0,003	1,538	0,159	SI
E-c4-i35-q091	4%	35%	9,1E-05	19,3	0,36	2,8	0,02	1064	0,003	2,419	0,297	SI
E-c4-i35-q144	4%	35%	1,4E-04	19,3	0,46	2,8	0,02	1064	0,003	3,232	0,383	SI
E-c4-i50-q020	4%	50%	2,0E-05	26,6	0,19	2,8	0,02	1064	0,002	0,646	0,085	SI
E-c4-i50-q042	4%	50%	4,2E-05	26,6	0,26	2,8	0,02	1064	0,002	1,791	0,317	SI
E-c4-i50-q079	4%	50%	7,9E-05	26,6	0,33	2,8	0,02	1064	0,003	1,965	0,217	SI
E-c4-i50-q096	4%	50%	9,6E-05	26,6	0,37	2,8	0,02	1064	0,004	1,304	0,095	SI
E-c4-i65-q033	4%	65%	3,3E-05	33,0	0,18	2,8	0,02	1064	0,004	0,877	0,074	SI
E-c4-i65-q058	4%	65%	5,8E-05	33,0	0,25	2,8	0,02	1064	0,004	1,242	0,100	SI
E-c4-i65-q089	4%	65%	8,9E-05	33,0	0,32	2,8	0,02	1064	0,003	2,103	0,201	SI
E-c4-i65-q126	4%	65%	1,3E-04	33,0	0,35	2,8	0,02	1064	0,004	2,647	0,217	SI
E-c6-i20-q035	6%	20%	3,5E-05	11,3	0,23	6,7	0,04	1096	0,008	0,063	0,005	NO
E-c6-i20-q053	6%	20%	5,3E-05	11,3	0,26	6,7	0,04	1096	0,009	0,090	0,007	NO
E-c6-i20-q081	6%	20%	8,1E-05	11,3	0,30	6,7	0,04	1096	0,009	0,156	0,011	SI
E-c6-i20-q115	6%	20%	1,2E-04	11,3	0,45	6,7	0,04	1096	0,007	0,204	0,018	SI
E-c6-i35-q031	6%	35%	3,1E-05	19,3	0,11	6,7	0,04	1096	0,017	0,048	0,002	NO
E-c6-i35-q054	6%	35%	5,4E-05	19,3	0,21	6,7	0,04	1096	0,010	0,117	0,008	NO
E-c6-i35-q093	6%	35%	9,3E-05	19,3	0,27	6,7	0,04	1096	0,010	0,193	0,012	SI
E-c6-i35-q131	6%	35%	1,3E-04	19,3	0,33	6,7	0,04	1096	0,006	0,685	0,076	SI
E-c6-i50-q032	6%	50%	3,2E-05	26,6	0,15	6,7	0,04	1096	0,006	0,208	0,023	SI
E-c6-i50-q054	6%	50%	5,4E-05	26,6	0,16	6,7	0,04	1096	0,004	1,203	0,229	SI
E-c6-i50-q083	6%	50%	8,3E-05	26,6	0,25	6,7	0,04	1096	0,003	1,352	0,286	SI
E-c6-i50-q112	6%	50%	1,1E-04	26,6	0,30	6,7	0,04	1096	0,003	1,682	0,362	SI
E-c6-i65-q046	6%	65%	4,6E-05	33,0	0,18	6,7	0,04	1096	0,003	0,842	0,175	SI
E-c6-i65-q062	6%	65%	6,2E-05	33,0	0,24	6,7	0,04	1096	0,003	0,844	0,173	SI
E-c6-i65-q093	6%	65%	9,3E-05	33,0	0,23	6,7	0,04	1096	0,004	1,518	0,274	SI
E-c6-i65-q112	6%	65%	1,1E-04	33,0	0,25	6,7	0,04	1096	0,005	1,451	0,225	SI
E-c6-i65-q138	6%	65%	1,4E-04	33,0	0,30	6,7	0,04	1096	0,005	1,203	0,160	SI
E-c8-i20-q043	8%	20%	4,3E-05	11,3	0,29	15,9	0,06	1128	0,019	0,004	0,000	NO
E-c8-i20-q060	8%	20%	6,0E-05	11,3	0,31	15,9	0,06	1128	0,019	0,008	0,001	NO
E-c8-i20-q086	8%	20%	8,6E-05	11,3	0,33	15,9	0,06	1128	0,016	0,019	0,002	NO
E-c8-i20-q117	8%	20%	1,2E-04	11,3	0,36	15,9	0,06	1128	0,019	0,020	0,002	NO
E-c8-i35-q040	8%	35%	4,0E-05	19,3	0,15	15,9	0,06	1128	0,018	0,015	0,001	NO
E-c8-i35-q058	8%	35%	5,8E-05	19,3	0,21	15,9	0,06	1128	0,017	0,021	0,002	NO
E-c8-i35-q081	8%	35%	8,1E-05	19,3	0,25	15,9	0,06	1128	0,016	0,028	0,003	NO
E-c8-i35-q114	8%	35%	1,1E-04	19,3	0,31	15,9	0,06	1128	0,018	0,029	0,002	NO

Magnitud	C	i	Q	θ	b	τ_f	K	ρ	h	Re	Fr^2	Presencia de Ondas Rodantes
Unidad	[%]	-	[m ³ /s]	[°]	[m]	[kg/m*s ²]	[kg/m*s]	[kg/m ³]	[m]	-	-	
E-c8-i50-q045	8%	50%	4,5E-05	26,6	0,14	15,9	0,06	1128	0,011	0,064	0,009	SI
E-c8-i50-q061	8%	50%	6,1E-05	26,6	0,16	15,9	0,06	1128	0,007	0,225	0,050	SI
E-c8-i50-q091	8%	50%	9,1E-05	26,6	0,17	15,9	0,06	1128	0,013	0,119	0,013	SI
E-c8-i50-q122	8%	50%	1,2E-04	26,6	0,26	15,9	0,06	1128	0,009	0,189	0,031	SI
E-c8-i65-q045	8%	65%	4,5E-05	33,0	0,12	15,9	0,06	1128	0,007	0,237	0,053	SI
E-c8-i65-q074	8%	65%	7,4E-05	33,0	0,15	15,9	0,06	1128	0,007	0,382	0,086	SI
E-c8-i65-q103	8%	65%	1,0E-04	33,0	0,17	15,9	0,06	1128	0,007	0,576	0,132	SI
E-c8-i65-q127	8%	65%	1,3E-04	33,0	0,23	15,9	0,06	1128	0,007	0,485	0,112	SI
E-c9-i20-q021	9%	20%	2,1E-05	11,3	0,37	24,5	0,07	1144	0,032	0,000	0,000	NO
E-c9-i20-q054	9%	20%	5,4E-05	11,3	0,37	24,5	0,07	1144	0,033	0,001	0,000	NO
E-c9-i20-q086	9%	20%	8,6E-05	11,3	0,37	24,5	0,07	1144	0,032	0,003	0,000	NO
E-c9-i20-q118	9%	20%	1,2E-04	11,3	0,38	24,5	0,07	1144	0,032	0,005	0,000	NO
E-c9-i35-q039	9%	35%	3,9E-05	19,3	0,20	24,5	0,07	1144	0,012	0,012	0,002	NO
E-c9-i35-q057	9%	35%	5,7E-05	19,3	0,22	24,5	0,07	1144	0,011	0,024	0,005	NO
E-c9-i35-q085	9%	35%	8,5E-05	19,3	0,24	24,5	0,07	1144	0,012	0,042	0,008	NO
E-c9-i35-q098	9%	35%	9,8E-05	19,3	0,25	24,5	0,07	1144	0,012	0,053	0,010	NO
E-c9-i50-q036	9%	50%	3,6E-05	26,6	0,13	24,5	0,07	1144	0,011	0,031	0,006	SI
E-c9-i50-q064	9%	50%	6,4E-05	26,6	0,13	24,5	0,07	1144	0,012	0,082	0,015	NO
E-c9-i50-q081	9%	50%	8,1E-05	26,6	0,15	24,5	0,07	1144	0,012	0,090	0,016	NO
E-c9-i50-q103	9%	50%	1,0E-04	26,6	0,23	24,5	0,07	1144	0,012	0,065	0,012	NO
E-c9-i65-q029	9%	65%	2,9E-05	33,0	0,09	24,5	0,07	1144	0,018	0,015	0,002	NO
E-c9-i65-q054	9%	65%	5,4E-05	33,0	0,11	24,5	0,07	1144	0,013	0,075	0,013	SI
E-c9-i65-q095	9%	65%	9,5E-05	33,0	0,13	24,5	0,07	1144	0,011	0,210	0,043	SI
E-c9-i65-q133	9%	65%	1,3E-04	33,0	0,17	24,5	0,07	1144	0,014	0,136	0,021	SI
E-c10-i20-q020	10%	20%	2,0E-05	11,3	0,51	37,8	0,08	1160	0,043	0,000	0,000	NO
E-c10-i20-q040	10%	20%	4,0E-05	11,3	0,43	37,8	0,08	1160	0,042	0,000	0,000	NO
E-c10-i20-q062	10%	20%	6,2E-05	11,3	0,44	37,8	0,08	1160	0,038	0,000	0,000	NO
E-c10-i20-q088	10%	20%	8,8E-05	11,3	0,41	37,8	0,08	1160	0,039	0,001	0,000	NO
E-c10-i20-q118	10%	20%	1,2E-04	11,3	0,42	37,8	0,08	1160	0,037	0,002	0,000	NO
E-c10-i35-q038	10%	35%	3,8E-05	19,3	0,26	37,8	0,08	1160	0,021	0,001	0,000	NO
E-c10-i35-q062	10%	35%	6,2E-05	19,3	0,24	37,8	0,08	1160	0,020	0,005	0,001	NO
E-c10-i35-q086	10%	35%	8,6E-05	19,3	0,25	37,8	0,08	1160	0,025	0,006	0,001	NO
E-c10-i35-q114	10%	35%	1,1E-04	19,3	0,29	37,8	0,08	1160	0,020	0,012	0,002	NO
E-c10-i50-q037	10%	50%	3,7E-05	26,6	0,16	37,8	0,08	1160	0,015	0,007	0,002	NO
E-c10-i50-q060	10%	50%	6,0E-05	26,6	0,18	37,8	0,08	1160	0,016	0,013	0,003	NO
E-c10-i50-q084	10%	50%	8,4E-05	26,6	0,19	37,8	0,08	1160	0,016	0,023	0,005	NO
E-c10-i50-q111	10%	50%	1,1E-04	26,6	0,23	37,8	0,08	1160	0,016	0,031	0,007	NO
E-c10-i65-q030	10%	65%	3,0E-05	33,0	0,12	37,8	0,08	1160	0,016	0,007	0,002	NO
E-c10-i65-q056	10%	65%	5,6E-05	33,0	0,14	37,8	0,08	1160	0,019	0,014	0,002	SI
E-c10-i65-q084	10%	65%	8,4E-05	33,0	0,18	37,8	0,08	1160	0,017	0,025	0,005	NO
E-c10-i65-q123	10%	65%	1,2E-04	33,0	0,19	37,8	0,08	1160	0,019	0,037	0,007	SI

ANEXO 2

RESULTADOS CARACTERIZACION REOLÓGICA DE LODOS BENTONÍTICOS

A continuación se muestran las tablas con los valores de la tasa de deformación angular ($\dot{\gamma}$), y el esfuerzo de corte (τ), obtenidas en la caracterización reológica de los lodos, para los distintos puntos considerados, en las cuatro concentraciones distintas ensayadas.

Experimento realizado con un lodo bentonítico de 4% p/p de concentración

Este experimento fue realizado con el par de cilindros concéntricos de medidas 1-1, de diámetros nominales de 32,54 mm, y 30 mm respectivamente.

Los resultados son los siguientes:

$\dot{\gamma}$	τ_1	τ_2	τ_3	Promedio
[s ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
19,7	3,9	3,41	3,98	3,8
39,4	4,28	3,87	4,37	4,2
59,1	4,68	4,4	4,75	4,6
78,7	5,26	4,9	5,29	5,2
98,4	5,77	5,44	5,84	5,7
118,1	6,29	6,12	6,34	6,3
137,8	6,78	6,63	6,81	6,7
157,5	8,02	7,88	7,94	7,9
177,2	9,32	9,26	9,25	9,3
196,9	10,6	10,5	10,5	10,5
216,5	11,9	11,9	11,7	11,8
236,2	13,2	13,1	12,9	13,1

Experimento realizado con un lodo bentonítico de 6% p/p de concentración

Este experimento fue realizado con el par de cilindros concéntricos de medidas 1-1, de diámetros nominales de 32,54 mm, y 30 mm respectivamente.

Los resultados son los siguientes:

$\dot{\gamma}$	τ_1	τ_2	τ_3	Promedio
[s ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
19,7	7,32	6,47	6,41	6,7
39,4	7,86	7,04	6,93	7,3
59,1	8,4	7,73	7,75	8
78,7	8,94	8,44	8,45	8,6
98,4	9,66	9,13	9,14	9,3
118,1	10,4	10,1	9,63	10
137,8	11	10,6	10,5	10,7
157,5	11,9	11,5	11,1	11,5
177,2	12,7	12,3	11,9	12,3
196,9	13,3	13,1	13	13,1
216,5	15,4	15,1	14,9	15,1
236,2	17,2	17	16,9	17

Experimento realizado con un lodo bentonítico de 8% p/p de concentración

Este experimento fue realizado con el par de cilindros concéntricos de medidas 2-2, de diámetros nominales de 26,03 mm, y 24 mm respectivamente.

Los resultados son los siguientes:

$\dot{\gamma}$	τ_1	τ_2	τ_3	Promedio
[s ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
19,7	16,9	17,6	17,5	17,3
39,4	18,2	18,1	18,3	18,2
59,1	19,6	19,4	19,5	19,5
78,8	21,3	20,6	20,8	20,9
98,5	22,1	21,2	21,8	21,7
118,2	22,6	22,5	23	22,7
137,9	23,9	23,1	24,2	23,7
157,6	25,1	24,7	24,9	24,9
177,3	26	26,3	26,2	26,2
197,0	27	27,1	27,1	27,1
216,7	28,5	28,8	27,9	28,4
236,5	29,8	29,2	30	29,7

Experimento realizado con un lodo bentonítico de 10% p/p de concentración

Este experimento fue realizado con el par de cilindros concéntricos de medidas 1-1, de diámetros nominales de 32,54 mm, y 30 mm respectivamente.

Los resultados son los siguientes:

$\dot{\gamma}$	τ_1	τ_2	τ_3	Promedio
[s ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
19,7	39,1	39,1	39,1	39,1
39,4	41,8	41,3	40,9	41,3
59,1	44,2	44,2	44,2	44,2
78,7	47	46,4	46,2	46,5
98,4	48,1	47,8	48	48
118,1	48,4	48,9	49,3	48,9
137,8	50,9	50,6	50,5	50,7
157,5	51,5	52	51,9	51,8
177,2	53,8	53,6	53,1	53,5
196,9	55,8	55,9	56,5	56,1
216,5	57,7	57,8	57,2	57,6
236,2	57,3	58,2	58,4	58

ANEXO 3

RESEÑA BIBLIOGRÁFICA

Alderman, N.J. y Hadelwang, R. A review of Newtonian and non-Newtonian flow in rectangular open channels. *Hydrotransport 17. The 17^o International Conference on the Hydraulic Transport of Solids*, The southern African Institute of Mining and Metallurgy and the BHR Group, 2007.

Este documento efectúa una revisión de las características de flujos de fluidos newtonianos y no newtonianos en canales rectangulares abiertos, y entrega expresiones teóricas de cálculo para cada caso. Luego, para el caso de fluidos no newtonianos, se comparan los resultados de dichas expresiones con información obtenida experimentalmente.

Balmforth, N. J., Craster, R. V., Rust, A. C., y Sassi, R. Viscoplastic flow over an inclined surface. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 142 (2007), 219-243. (si son mas de 2 autores, poner et al.)

En este paper se realiza una modelación numérica de las ecuaciones constitutivas de los flujos viscoplásticos, sujetas a la aproximación de la teoría de lubricación para escurrimientos de baja altura y baja velocidad; para posteriormente comparar los resultados obtenidos con resultados experimentales obtenidos de flujos de soluciones de caolín (un tipo de arcilla).

En este documento se presentan numerosos diagramas y gráficos de las características de los escurrimientos.

Balmforth, N. J., Craster, R. V. y Sassi, R. Shallow viscoplastic flow on an inclined plane. *J. Fluid Mech.* 470, 1-29.

En el presente paper se analizan teóricamente los flujos no newtonianos. El análisis se centra en la ley constitutiva Herschel-Bulkley, aplicando la aproximación dada por la teoría de lubricación, y obteniendo un conjunto de ecuaciones más simples, que son resueltas analíticamente y numéricamente. Las soluciones son mostradas gráficamente, a través de figuras de flujos adimensionalizadas.

Coussot, Philippe Steady Laminar Flow of Mud in Open Channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol 32, 535-559

Este paper consiste en el análisis de una serie de experimentos de flujos laminares de lodos de arcilla en canales rectangulares y trapezoidales. Las aproximaciones teóricas son basadas en el modelo de Herschel & Bulkley. En particular, en los experimentos en canales rectangulares, hay un análisis particular del flujo uniforme sobre un plano infinitamente ancho, utilizando la aproximación altura del flujo/ancho del canal $< 0,1$.

Balmforth, N. J., Bush, J. W. M. y Craster, R. V. Rolling on Custard (2004)

Se estudia la formación de ondas rodantes en una pasta de almidón de maíz, y los límites del número de Reynolds para definir la estabilidad de los flujos. Particularmente, se estudió la inusual aparición de ondas en flujos con valores muy bajos de Re.

Vittorio di Federico, Free-surface flow of Hyperconcentrations. *Fluid Dynamics Research* 24 (1999) 23-36.

Estudio de flujos unidimensionales de hiperconcentraciones (mezclas de agua con altas concentraciones de sólidos) son estudiados de manera teórica, empleando soluciones analíticas y numéricas a las ecuaciones constitutivas de dichas mezclas, y enfatizando la importancia de las fuerzas viscosas sobre las características del flujo. El estudio se basa en la ecuación constitutiva base de los fluidos no newtonianos, que consta de tres coeficientes de esfuerzos básicos: fluencia, término lineal, y término cuadrático.

Huang X. y García M. H., A Perturbation Solution for Bingham Plastic Mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering* Nov. 2007, pp 986-994.

Determinación de una solución para flujos bidimensionales de plásticos de Bingham. El desarrollo se basa en las ecuaciones de movimiento, y las soluciones son para el caso de una fuente permanente de caudal, o una fuente puntual de un volumen limitado de fluido (asimilando la rotura de una presa de relaves, por ejemplo). También se efectúa un análisis de perturbaciones. Finalmente los resultados son expresados en forma gráfica. Uno de los gráficos indica que las soluciones de altura para el caso de una fuente puntual y el caso de una fuente de volumen limitado son muy parecidos.

Chiang C. Mei y Masatoshi Yuhi, Slow Flow of a Bingham Fluid in a Shallow Channel of Finite Width. *Journal of Fluid Mechanics* (2001) vol. 431 pp 135-159.

En este documento se presenta una teoría para el flujo tri-dimensional de un plástico de Bingham, en un canal ancho de baja pendiente. Se consideran flujos lentos, caudales pequeños, se ignoran los efectos inerciales y se aplica la aproximación de onda larga (long-wave). Asimismo, se consideran secciones de canales de forma triangular y parabólica. Como resultados se entregan distribuciones de velocidad (en forma de gráficos tridimensionales), y además se incluye un análisis de frentes de ondas. Finalmente, se efectúa un análisis de propagación de fluido, luego de una rotura de una presa.

Roberts A. J., The Inertial Dynamics of Thin Film Flow of Non-Newtonian Fluids. February 2, 2008.

Se presenta el modelamiento de un flujo de baja altura de fluido no-newtoniano, en el caso en que la viscosidad depende no linealmente de la tasa de deformación angular. Para el análisis se modifica la condición de borde en la superficie libre, asignándole al esfuerzo de corte un valor distinto de cero, proporcional a la velocidad en cada punto. En el documento se muestran ecuaciones de movimiento resultantes para estos flujos.

H. Chanson, S. Jarny, L. Tocquer y P. Coussot, An Experimental Study of Sudden Release of Bentonite Suspensions Down an Inclined Chute. 15° Australasian Fluid Mechanics Conference, 13-17 December 2004.

Este es un experimento que consiste en liberar repentinamente flujos de bentonita. Los distintos fluidos poseen diferentes concentraciones de bentonita, y diferentes tiempos de reposo previo. Se mide la altura del fluido, la posición del frente de onda, y la forma de ésta. Finalmente se deduce que el tiempo de reposo es muy importante en estos resultados, ya que a mayor tiempo de reposo, menor es la velocidad de propagación del fluido.

Zhao-Yin Wang, Free Surface Instability of non-Newtonian Laminar Flows. J. of Hydraulic Research, Vol. 40, 2002, N°4. pp 449-460.

En este *paper* se analiza la inestabilidad de flujos de fluidos no-newtonianos, a partir de dos números adimensionales, S_v y S_{vis} , que representan los efectos del esfuerzo de fluencia y de la viscosidad, respectivamente. Se concluye que la superficie libre es inestable cuando S_y es mucho mayor que S_{vis} , y es estable si S_y es menor que S_{vis} . Finalmente, se presentan estudios experimentales que concuerdan con el análisis inicial.

Yuhi, M. y Mei, C. C., Slow Spreading of Fluid Mud Over a Conical Surface. J. Fluid Mech. (2004), vol. 519, pp. 337-358.

Este documento muestra el estudio numérico del movimiento lento de lodo (tipo plástico de Bingham), sobre una superficie cónica de baja pendiente. Se utiliza la aproximación de lubricación. Inicialmente se estudian los límites para que se inicie el movimiento, para después representar numerosos casos de flujos de volúmenes fijos de lodos. Las soluciones se presentan de forma gráfica.