

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
REOLÓGICO DE LAVAS TORRENCIALES VISCOSAS MEDIANTE
UN MODELO FÍSICO REDUCIDO PARA CALIBRAR UN MODELO
NUMÉRICO DE SIMULACIÓN DE FLUJO UNIDIMENSIONAL
HIPERCONCENTRADO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Arvelo G., Rommy G.
Díaz H., Reinaldo J.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
REOLÓGICO DE LAVAS TORRENCIALES VISCOSAS MEDIANTE
UN MODELO FÍSICO REDUCIDO PARA CALIBRAR UN MODELO
NUMÉRICO DE SIMULACIÓN DE FLUJO UNIDIMENSIONAL
HIPERCONCENTRADO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rodolfo Berrios.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Arvelo G., Rommy G.
Díaz H., Reinaldo J.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 05 de mayo de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

ARVELO ROMMY y DIAZ REINALDO

Titulado:

“ANALISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LAVAS TORRENCIALES VICOSAS MEDIANTE UN MODELO FISICO REDUCIDO PARA CALIBRAR UN MODELO NUMERICO DE SIMULACION DE FLUJO UNIDIMENSIONAL HIPERCONCENTRADO”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. Henry Flores
Jurado



Prof. Josué León
Jurado

Prof. Rodolfo Berrios
Tutor

DEDICATORIA

*A Dios y a nuestras Familias
Díaz-Arvelo*

AGRADECIMIENTOS

Con gusto aprovechamos la oportunidad de agradecer a las siguientes personas a la Magna Yajariyu, Flor, Naho, Javier, Jorge, Lazlo, Nelson; Rubén Adriana Romero, Eduardo, Carlos Sánchez, Oriana, Víctor, Perú, El ,Gordo Rafa, Carmelo, Carlos Navarro, Johnny, Emilio, Araque, Vizcaya, Yoel, El Señor Armando, Maryan, Maryangel, Gustavo, Barreto, Oneida, Mariangel, Yoseberling, Elizabeth, Daliana, Alejandra C., Adilex, Germán, Gustavo Vázquez, Claudio, Rafael Hernández, Andrés Arcas, Héctor Rengifo, Kevin Álvarez, Pavel y Virginia., Eduardo Pérez, Ana, por el ánimo, su amistad y la colaboración brindada.

A los profesores Rodolfo Berrios, Ramón Sánchez, Josué León, Henry Flores, Coussot, Antonio Barragán, Manuel Martínez, Barrillas, Armando Blando, A. Nieto, Freddy Pérez. Cesar Noguera, Tibusay Zambrano, Francisco Garcés, Dulio Marcial por ayuda y las explicaciones dadas para realizar este proyecto.

Y por ultimo un agradecimiento especial a Dios y a cada uno de los miembros de nuestras familias: abuelas, madres, padres, hermanas, primos, tíos y tías, por su paciencia, comprensión y todos los consejos dados, en todas las etapas de nuestra carrera.

Arvelo C., Rommy A. y Díaz H., Reinaldo J

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
REOLÓGICO DE LAVAS TORRENCIALES VISCOSAS MEDIANTE
UN MODELO FÍSICO REDUCIDO PARA CALIBRAR UN MODELO
NUMÉRICO DE SIMULACIÓN DE FLUJO UNIDIMENSIONAL
HIPERCONCENTRADO**

**Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios. Caracas, U. C. V.
Facultad de Ingeniería,
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009.**

Palabras Claves: Esfuerzo de cedencia; flujos hiperconcentrado; penetrómetro; Pashias; lavas torrenciales.

En este trabajo de grado se analizó el comportamiento reológico experimental de lavas torrenciales viscosas, mediante un modelo físico reducido para calibrar un modelo numérico de simulación de flujo unidimensional hiperconcentrado. Constó de tres etapas una teórica en la cual se obtuvieron las ecuaciones constitutivas que rigen al comportamiento no newtoniano de las lavas torrenciales, la experimental en donde determinan sus propiedades reológicas por medio de métodos empíricos del ensayo del penetrómetro, la prueba de Pashias y el reómetro de bola, además se utilizó el viscosímetro rotativo Fann 35° y el Anton Para, cuyos resultados validaron los resultados obtenidos con los métodos empíricos. Paralelamente se realizaron rompimientos de compuerta en un modelo físico reducido (canal) y por último la etapa numérica donde se utilizó el modelo numérico de simulación unidimensional de rompimientos de compuerta de flujos hiperconcentrados Waraira Flow V1.0., y sus soluciones numéricas se compararon satisfactoriamente con los resultados del ensayo realizado en el modelo físico reducido (canal).

Arvelo C., Rommy A. y Díaz H., Reinaldo J

**ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF
VISCOSITY TORRENTIAL LAVAS BY MEANS OF A REDUCED
PHYSICAL MODEL FOR CALIBRATING A MODEL NUMERICAL
FOR SIMULATION ONE-DIMENSIONAL HYPERCONCENTRATED
FLUID**

**Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios. Caracas, U. C. V.
Facultad de Ingeniería,
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2009.**

Key words: Yield Stress, Hyperconcentrated Fluid, Penetrometer, Pashias, Torrential Lavas

In the present study, the rheological behavior of viscous torrential lavas was analyzed using a physical model in order to calibrate a numerical model for simulation of one dimensional hyperconcentrated fluid. The study was divided in three parts, the first one, was a theoretical part where the constitutive equations that represent the non Newtonian behavior of torrential lavas was gotten, the second part was an experimental part where the rheological properties was gotten by the use of empirical methods like the penetrometer, Pashias test and ball rheometer , besides a Fann 35° viscometer and a Aston Par were use for validate the results that were obtained with the empirical methods. Dam breaks were also simulated in a physical model. The last part was a numerical part where Waraira Flows V1.0 the numerical model for the simulation of one dimensional hyperconcentrated fluid was used, and its results had successfully compared with the results gotten in the physical model.

NOMENCLATURA Y SÍMBOLOS

A : Área de la sección

A_x^y : Salida del canal de forma prismática

B : Ancho del tope

C : concentración de sedimentos de la mezcla

C_D : Coeficiente de arrastre.

C_v : Concentración en volumen

d_c : Diámetro de partículas

F_g : Peso del penetrómetro

F_b : Fuerza debida a la resistencia a la flotabilidad

F_y : Fuerza debida a la resistencia al esfuerzo de cedencia del fluido

F_{mb} : Fuerza resistiva al movimiento de la bola

H_c : Altura del cilindro de la prueba de Pashias

h : Altura de penetración del penetrómetro

h_f : Altura final de la muestra de la prueba de Pashias

g : Aceleración de la gravedad.

K : Consistencia de Herschel-Bulkley

L_h : Excentricidad del reómetro de bola

M_{caolin} : Masa del caolín

M_p : Masa de caolín a pesar

M_{agua} : Masa de agua

M : Momento.

m_p : Masa del penetrómetro.

n : Índice de potencia de Herschel-Bulkley.

N_b : Número de Bagnold.

P : perímetro mojado

R : radio hidráulico

r_p : Radio de la polea

R_e : Número de Reynolds

S : Diferencia entre la altura del cilindro y altura final de la muestra de la prueba de Pashias

S_o : Pendiente del fondo

S_f : Resistencia a la fricción

$\%S$: Porcentaje de solido

t : tiempo

u : Velocidad del fluido

V : Velocidad media

v : Velocidad de la bola

V_{solo} : Volumen de sólido

V_{agua} : Volumen de agua

V_A : Volumen de la cámara A

V_B : Volumen de la cámara B

V_o : volumen muerto en las tuberías del circuito hidráulico.

$\%W$: Concentración de líquido de la mezcla.

$\%w$: Porcentaje de humedad en el caolín.

x : Distancia a lo largo del canal

y : Profundidad del flujo

p_v : Pendiente de la curva de esfuerzo de corte contra la tasa de deformación

y_p : Esfuerzo mínimo necesario para que el fluido fluya.

α : Angulo de inclinación de la canal.

τ : Esfuerzo de corte

τ_y : Esfuerzo de cedencia

$\dot{\gamma}$: Tasa de deformación

ϕ : Concentración de la mezcla

ϕ_c : Concentración crítica

η : Viscosidad dinámica

ν : Viscosidad cinemática

μ_B : Viscosidad de Bingham

μ_c : Viscosidad de Casson.

σ_{ij} : Tensor de esfuerzos.

ρ : Densidad

ρ_s : Densidad del sólido

ρ_f : Densidad del líquido

ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS	xv
LISTA DE FIGURAS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivos de la investigación.....	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificación del problema.....	5
1.4 Antecedentes	7
CAPITULO II MARCO TEORICO	27
2.1 Fluidos reopéticos y tixotrópicos	27
2.2 Reometría.....	27
2.3 Análisis teórico.....	29
2.3.1 Determinación de las Ecuaciones de movimiento y ecuaciones constitutivas.	29
2.3.2 Flujo no permanente unidimensional de un líquido confinado en un canal abierto	31
2.3.3 Flujo sobre un plano inclinado infinitamente ancho	32
2.4 Procesos gravitacionales	36
2.5 Causas de los procesos gravitacionales.....	37
2.6 Clasificación de los procesos gravitacionales	39
2.7 Tipos de procesos gravitacionales.....	40
2.7.1 Desplomes	40
2.7.2 Reptación.....	41

2.7.3	Deslizamientos de rocas.....	42
2.7.4	Flujos de tierras	43
2.7.5	Soliflucción.....	43
2.8	Flujo de detritos o de derrubios.....	44
2.9	Propiedades físicas de los flujos detríticos.....	52
2.10	Interacciones de los componentes de los flujos detríticos	54
2.11	Introducción a las suspensiones reológicas.....	55
2.11.1	Efectos del movimiento Browniano.....	56
2.11.2	Efectos Hidrodinámicos	56
2.11.3	Efectos de empaquetamiento.....	57
2.11.4	Efectos inerciales	57
2.11.5	Efectos Coloidales.....	58
2.12	Reología de mezclas de agua y arcilla	60
2.13	Efectos de otros parámetros en el flujo de agua y arcilla.....	62
2.13.1	Efectos de la concentración.....	62
2.13.2	Efecto el esfuerzo de Cedencia	64
2.13.3	Efecto de las propiedades elásticas	64
2.13.4	Efecto de la temperatura.....	65
2.13.5	Efecto del pH y de los electrolitos	66
2.13.6	Efecto del tamaño de las partículas.....	66
2.14	Métodos no convencionales para la medición de esfuerzos de cedencia en fluidos hiperconcentrados.....	67
2.14.1	Prueba de Pashias	67
2.14.2	Medición del esfuerzo de cedencia estático por medio del penetrómetro.....	69
2.14.3	Medición del esfuerzo de cedencia estático por medio del reómetro de bola.....	71

2.14.4	Modelo físico reducido	75
2.15	Caolín	76
2.15.1	Composición del caolín.....	76
CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO		78
3.1	Materiales	78
3.2	Diseño y construcción del penetrómetro.....	79
3.3	Diseño y construcción del reómetro de bola.....	81
3.4	Diseño y construcción del modelo físico reducido (canal)	84
3.5	Preparación de la mezcla.....	85
3.6	Ensayo del penetrómetro.....	87
3.7	Ensayo de Pashias	88
3.8	Ensayo del reómetro de bola.....	89
3.9	Ensayo con el viscosímetro rotativo	90
3.10	Ensayo con el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300	92
3.11	Ensayo con el modelo físico reducido	93
3.12	Análisis Numérico unidimensional	94
3.13	Calibración del modelo numérico Waraira Flow V.1.0	95
CAPITULO IV RESULTADOS EXPERIMENTALES		96
4.1	Resultados Experimentales	96
4.2	Resultados del modelo numérico Waraira Flor V 1.0.....	111
4.3	Protocolo de ensayo	118
CAPITULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS		123
5.1	Análisis de resultados experimentales	123
5.2	Análisis de resultados del modelo numérico.....	128
CAPITULO VI CONCLUSIONES		130
CAPITULO VII RECOMENDACIONES.....		132
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		134

APÉNDICES.....	136
Apéndice I: Ecuaciones del movimiento análisis numérico unidimensional (servación de la masa y conservación del momentum).....	138
Apéndice II: Solución numérica del modelo unidimensional: Método del Elemento Finito Petrov-Galerkin.....	140
Apéndice III: Reómetro de plato rotativo	149
Apéndice IV: Tabla de datos.....	151
Apéndice V: Datos, resultados del modelo Numérico Waraira Flow V1.0 y del ensayo de Pashias.....	154
ANEXOS	162

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Descripción de los penetrómetros utilizados en el ensayo.....	80
Tabla 4.1 Resultados obtenidos en el ensayo del penetrómetro.....	97
Tabla 4.2 Esfuerzos obtenidos con el ensayo del penetrómetro para mezclas... de concentraciones de 25% Cv, 30% Cv, 33% Cv y 35% Cv	98
Tabla 4.3 Resultados obtenidos por la prueba de Pashias.....	99
Tabla 4.4 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 25% Cv.....	100
Tabla 4.5 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 30% Cv.....	100
Tabla 4.6 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 33% Cv.....	100
Tabla 4.7 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 35% Cv.....	101
Tabla 4.8 Esfuerzos de cedencia obtenidos con el reómetro de bola.....	101
Tabla 4.9 Esfuerzos de cedencia obtenidos a partir de los ensayos utilizando el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Desplazamientos de los frentes de onda laminar y dispersivos obtenidos del modelo numérico y del modelo físico obtenidos por Aguirre, J., Moncada, A. y Olivero M. [1]	17
Figura 1.2 Curvas de elevación constante que indican la deposición numérica y experimental del fluido en el canal usado por. Aguirre, J., Moncada, A. y Olivero M.	18
Figura 1.3 Esfuerzo de cedencia en función de la concentración volumétrica en distintas zonas del estado Vargas, Venezuela.....	23
Figura 1.4 Curva de flujo para diferentes concentraciones de flujo detrítico depositados en Carmen de Uría durante la tragedia del año 1.999	23
Figura 2.1 Perfil de flujo sobre un plano inclinado.....	33
Figura 2.2 Perfil de velocidades para un flujo uniforme sobre un plano inclinado	36
Figura 2.3 Representación gráfica de un desplome	40
Figura 2.4 Esquema del proceso de reptación.....	42
Figura 2.5 Representación gráfica de un deslizamiento de rocas	42
Figura 2.6 Representación gráfica de un flujo de tierra.....	43
Figura 2.7a y 2.7b los perfiles de un flujo típico de detríticos y la morfología en planta de una zona que ha sufrido un deslizamiento de tierras que se convierte al final en un flujo detrítico.....	45
Figura 2.8 Clasificación de los flujos detríticos (A-D) y otros movimientos inducidos por la gravedad (E-H).....	47
Figura 2.9 Características y clasificación de los flujos detríticos	49
Figura 2.10 Principio de la prueba de Pashias	68
Figura 2.11 Esquema del penetrómetro	69
Figura 2.12 Diagrama de fuerzas sobre el penetrómetro	70

Figura 2.13 esquema del reómetro de bola	72
Figura 3.1 Reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300.....	92
Figura 4.1 Gráfica del esfuerzo de corte en función de la tasas de deformación para mezclas de agua y caolín a diferentes concentraciones.....	102
Figura 4.2 Gráfico comparativo entre los esfuerzos de cedencia obtenidos para cada concentración de acuerdo con el ensayo utilizado.....	103
Figura 4.3 Imágenes fotográficas correspondientes al avance del fluido en el ensayo de la mezcla de 25 % Cv con el modelo físico reducido.	106
Figura 4.4 Imágenes fotográficas correspondientes al avance del fluido en el ensayo de la mezcla de 30% Cv con el modelo físico reducido.	107
Figura 4.5 longitud alcanzada en función del tiempo durante el ensayo con el modelo físico reducido utilizando una mezcla de agua y caolín al 25% Cv.....	108
Figura 4.6 longitud alcanzada en función del tiempo durante el ensayo con el modelo físico reducido utilizando una mezcla de agua y caolín con 30%.....	108
Figura 4.7 Imágenes fotográficas correspondientes al avance del fluido en el ensayo de la mezcla de 30% Cv con el modelo físico reducido.	110
Figura 4.8 Perfiles de flujo obtenidos a partir de la simulación numérica de un deslave para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv.....	113
Figura 4.9 Perfiles de flujo obtenidos a partir de la simulación numérica de un deslave para una mezcla de agua y caolín al 30% Cv.....	114
Figura 4.10 Perfiles de flujo obtenidos a partir de la simulación numérica de un deslave para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv con una pendiente del 6%	116
Figura 4.10 Comparación de la longitud alcanzada por el frente de onda en el ensayo con el modelo físico reducido y el modelo numérico de simulación Waraira Flow V 1.0 para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv.....	117

Figura 4.11 Comparación de la longitud alcanzada por el frente de onda en el ensayo con el modelo físico reducido y el modelo numérico de simulación Waraira Flow V 1.0 para una mezcla de agua y caolín al 30% Cv..... 117

Figura 4.12 Comparación de la longitud alcanzada por el frente de onda en el ensayo con el modelo físico reducido y el modelo numérico de simulación Waraira Flow V 1.0 para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv en un plano inclinado con una pendiente del 6% 118

INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los deslizamientos súbitos de tierra ocasionan enormes tragedias y grandes pérdidas económicas en regiones montañosas y, en la actualidad, tienen una importancia a nivel mundial. A mediados de diciembre de 1999, Venezuela se convirtió en escenario de este tipo de deslizamiento. En el estado Vargas, ubicado al norte del país, el potencial destructor de las lavas torrenciales trajo resultados fatales. En líneas generales, los deslizamientos se caracterizan por el flujo violento de materiales completa o parcialmente saturado de rocas y fragmentos transportados en una matriz granular más fina. Las ondas generadas por el deslizamiento de tierra, extiende el potencial de daño más allá de los límites de las áreas donde se depositan, y pueden ser muy destructivos.

Las inundaciones de barros y escombros, tales como aquellas causadas por un deslizamiento de tierra que genera el flujo de barros y detritus, son un fenómeno único de flujo no permanente en el cual éste cambia rápidamente y las propiedades del fluido en movimiento compuesto por una mezcla de barro, fragmentos desintegrados y agua son muy diferentes al del agua pura.

Debido a que los estudios de los flujos de lodos son complejos es necesario estudiar modelos generalizados de flujo en los cuales se puedan medir con facilidad las propiedades reológicas para luego extrapolarla a los flujos reales..

La finalidad de esta investigación es estudiar el comportamiento de lavas torrenciales viscosas mediante el uso de métodos empíricos y la aplicación de un modelo físico reducido que permitan obtener las propiedades reológicas del fluido y de esta manera calibrar un modelo numérico de simulación unidimensional de flujo hiperconcentrado.

Este Trabajo Especial de Grado consta de siete capítulos. el primero de ellos, titulado “El Problema”, se define el tema de la investigación de una descripción breve de los antecedentes.

El segundo capítulo denominado “Marco Teórico”, expone varios aspectos claves de este proyecto: análisis teórico de las ecuaciones que rigen del movimiento del fluido, los procesos gravitacionales que generan las lavas torrenciales, la reología de mezclas de agua con arcilla y la descripción de los métodos empíricos para determinar el esfuerzo de cedencia.

El tercer capítulo, el metodológico, describe la parte experimental para determinar el esfuerzo de cedencia por medio de los métodos empíricos y también con el viscosímetro rotativo y el reómetro Anton Paar y la calibración del modelo numérico.

En los capítulos cuatro, cinco y seis se desarrolla el aporte real de este proyecto. Los resultados obtenidos, el análisis de éstos y sus conclusiones conllevan a la elaboración de un séptimo y último capítulo, denominado “Recomendaciones”.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

El aumento de temperatura del planeta ha incrementado la evaporación de las aguas oceánicas ocasionando un aumento de la frecuencia e intensidad de las lluvias. Paralelamente, las elevadas pendientes de algunas zonas llegan a causar el desprendimiento de laderas inestables y el rompimiento de represas naturales provocando un flujo violento de agua y escombros, conocido como “lava torrencial” que desciende a alta velocidad destruyendo todo lo que encuentre a su paso.

Debido a la imposibilidad de predecir cuándo y dónde va a ocurrir un deslave o inundación de barro y escombros, estos fenómenos ocasionan enormes tragedias y grandes pérdidas, especialmente en las regiones montañosas. Los deslizamientos súbitos de tierra se caracterizan por el flujo violento de materiales completa o parcialmente saturados de rocas y fragmentos transportados en una matriz granular más fina. Las inundaciones de escombros y barros, tales como las causadas por un deslizamiento de tierra, generan flujos de barros y detritos no permanente y con propiedades difíciles de estudiar debido a la complejidad de la mezcla que fluye y la velocidad de la misma.

Consciente de que los cambios climáticos que se están suscitando en el planeta han aumentando la frecuencia del desarrollo de inundaciones y

deslaves, se pretende mediante este proyecto de investigación estudiar las propiedades y el comportamiento de los fluidos hiperconcentrados que puedan ser usados para describir el flujo de barro, permitiendo en un futuro generar propuestas que disminuyan las pérdidas tanto humanas como materiales.

1.2 Objetivos de la investigación.

1.2.1 Objetivo General

- § Analizar de manera experimental el comportamiento reológico de lavas torrenciales viscosas mediante la aplicación de un modelo físico reducido que permita calibrar un modelo numérico de simulación unidimensional para flujo hiperconcentrado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- § Diseñar un protocolo de ensayo para determinar el comportamiento reológico de lavas torrenciales viscosas artificiales
- § Realizar pruebas de rompimiento de presa en planos horizontales e inclinados con un modelo físico reducido.
- § Calibrar del modelo numérico con las propiedades reológicas obtenidas experimentalmente.

1.3 Justificación del problema

Las investigaciones científicas previas han determinado que los fenómenos de ruptura de compuertas, deslaves y flujos detríticos generan flujos que, debido a la incorporación de masa, pueden formar frentes hiperconcentrados, en general devastadores. En especial, en aquellas zonas situadas alrededor y en el curso del flujo generado, afectando el medio ambiente de forma violenta debido a las altas velocidades del flujo y la sedimentación de los derrubios arrastrados.

En Venezuela anualmente se producen episodios de flujos detríticos y derrumbes ocasionados por precipitaciones intensas que producen un número significativo de pérdidas humanas y materiales: Un ejemplo claro del impacto que estos fenómenos producen fue la tragedia ocurrida durante los últimos días del año 1.999. Fuertes lluvias azotaron a los estados Vargas y Miranda durante más de una semana, ocasionando el colapso de la represa El Guapo y derrumbes en el cerro El Ávila que generaron flujos detríticos que acabaron con varias zonas pobladas.

De allí la importancia de estudiar cómo se generan y el comportamiento de este tipo de flujos naturales, con el objeto de ser capaces de elaborar medidas preventivas que reduzcan el impacto de estos fenómenos.

Los equipos electrónico necesarios para el estudio de flujos detríticos son de uso complejos y costoso, por lo cual en esta investigación se realizan estudios con reómetros de uso manual que permiten la toma de datos en campo, facilitando la descripción del fenómeno.

El número de variables que intervienen durante la iniciación y el proceso de flujos detríticos es enorme, siendo el más importante el esfuerzo de cedencia del fluido ya que este representa un valor de esfuerzo crítico que da inicio al flujo.

En esta investigación se propone obtener el valor de dicho esfuerzo para mezclas de agua y caolín con diferentes concentraciones. El fluido estudiado es una simplificación de un fluido real, sin embargo los resultados obtenidos permitirán tener una idea de la magnitud de un fenómeno real y estimular el desarrollo de medidas preventivas que informen a las poblaciones que se encuentren en zonas de riesgo, así como también estimular el desarrollo de investigaciones con flujos reales

1.4 Antecedentes

Bagnold en el año 1954 realizó experimentos utilizando una variedad de dispersiones de esferas de cera que poseían una flotabilidad neutra y diámetros de 1,3 mm. Dichas esferas estaban suspendidas en una mezcla de agua, glicerina y alcohol. Bagnold realizó las pruebas de la dispersión en un aparato de corte constituido por dos cilindros verticales concéntricos. El cilindro interno permanecía inmóvil, mientras que el cilindro externo rotaba a diferentes velocidades (Ω). Dicho aparato medía los esfuerzos de corte en el fluido basado en las mediciones del torque que sobre el cilindro interno se inducía mientras que el cilindro externo rotaba. Adicionalmente, el esfuerzo normal de la mezcla del fluido se obtuvo a partir de las mediciones de la diferencias de presiones entre las dos cámaras del aparato de corte; la primera cámara se encontraba dentro del cilindro interno y estaba completamente llena de agua, mientras que la segunda cámara la constituía el espacio entre el cilindro interno y el externo, el cual era llenado con las diferentes dispersiones estudiadas [20].

Las mezclas utilizadas en los experimentos fueron once en total. Diez de ellas estaban formadas por diferentes concentraciones en volumen (C_v) de esferas de cera ($0,135 < C_v < 0,623$) en agua y una mezcla formada por glicerina y alcohol con una concentración de $0,55 C_v$.

A partir de los resultados obtenidos, Bagnold definió dos regímenes de flujo de acuerdo con el valor del número de Bagnold (N_b). En el primero de ellos, llamado régimen inercial de grano con un $N_b \geq 450$, los esfuerzos de

corte y los esfuerzos normales fueron hallados dependientes del cuadrado de la tasa de corte.

El segundo régimen de flujo, llamado macro viscoso, fue definido por un $Nb \leq 40$. En dicho régimen los esfuerzos normales y de corte fueron encontrados linealmente dependientes de la tasa de corte.

Adicionalmente, Bagnold definió un régimen de transición en el cual $40 \leq Nb \leq 450$. En este caso la dependencia de los esfuerzos de corte y normal con la tasa de corte se incrementa progresivamente, pasando de ser una relación lineal a ser una relación cuadrática [20].

Los experimentos realizados por Bagnold fueron luego revisados por Hunt en el año 2002. Hunt analizó los materiales utilizados por Bagnold y demostró, con base a los resultados de Bagnold, que el esfuerzo de corte en el régimen inercial de grano no era dependiente del cuadro de la tasa de corte. Por el contrario la dependencia era con la tasa de corte elevada a la 1,5 potencia. Hunt atribuyó esta diferencia a la manera sencilla en la cual Bagnold llevó a cabo sus experimentos, ya que, en el aparato utilizado por Bagnold, la corta longitud del cilindro relativa a la distancia entre los cilindros H ($L/H= 4,6$) indujo flujos secundarios perpendiculares al flujo de corte a través de la superficie del fondo y en los mismos cilindros debido a la alta velocidad de rotación. Como consecuencia, la dependencia del esfuerzo de corte con la tasa de corte elevada a la 1,5 no fue debida a la colisión de las esferas (granos) sino más bien a los flujos secundarios. Hunt concluyó que sin estos flujos secundarios, un régimen macro viscoso y una dependencia lineal del esfuerzo de corte con la tasa de deformación serían obtenidos en todos los experimentos.

Por lo tanto, Hunt propuso que el esfuerzo de corte se obtuviese tratando a la dispersión como un fluido Newtoniano, el cual tendría una viscosidad corregida μ' , que podía ser obtenida por medio de la relación Krieger-Dougherty (Krieger 1972) [20].

En 1983 Savage & McKeown realizaron experimentos similares a los hechos por Bagnold, pero permitieron que el cilindro interno del aparato de corte rotara, además investigaron los efectos de la rugosidad interna de los cilindros. Los resultados que obtuvieron verificaron lo establecido por Bagnold: efectivamente, el esfuerzo de corte depende del cuadrado de la tasa de corte para régimen de grano inercial. No obstante concluyeron que dicha relación no necesariamente era producto de las colisiones de los granos, sino que podía deberse a efectos turbulentos en el fluido durante la realización de la prueba.

Takahashi en 1991 desarrolló una teoría para explicar el proceso de iniciación de un flujo detrítico granular y el proceso de deposición, considerando la erosión y la segregación que ocurre durante el flujo. Su teoría se basó en los estudios realizados por Bagnold (1954), Shen&Ackermann (1982), Tsubaki y Myamoto (1991) y Savage&McKeown (1983), los cuales encontraron que el esfuerzo de corte es proporcional al cuadrado de la tasa de corte $\dot{\gamma}$.

Adicionalmente, y basado en los experimentos con material grueso, Takahashi desarrolló la siguiente fórmula para determinar la concentración en volumen (C_v) de las partículas gruesas transportadas en el flujo, como una

función del ángulo de inclinación (i) de la superficie, respecto a las siguientes condiciones de frontera $i < 26^\circ$ y $C_v < 0,9 Co$ [20].

$$C_v = \frac{\rho_f \cdot \tan i}{(\rho_s - \rho_f)(\tan \varphi - \tan i)} \quad (1)$$

donde φ es el ángulo de fricción interna de las partículas, ρ_s es la densidad de las partículas sólidas y ρ_f es la densidad del líquido.

Armanini *et al.* (2003) mostró que la ecuación (1) no permite determinar la concentración cuando se tienen mezclas no granulares con gran cantidad de partículas finas que fluyen corriente abajo sobre una superficie con poca inclinación ($0^\circ < i < 12^\circ$) [20].

Iverson (1997) elaboró una introducción general de todos los procesos físicos involucrados en los flujos detríticos, incluyendo desde los principios de termodinámica hasta la disipación final de energía en forma de calor. En contraste con otros autores, Iverson sostuvo que para un régimen inercial se debe hacer énfasis en una relación entre las tasas de corte, pero la fluctuación de la energía de grano debe ser expresada en función de la temperatura $T_g = (v')^2$, de la misma forma que fue expresada por Jenkins&Savage (1983) para flujos granulares. En el caso estudiado por Iverson, v' es la fluctuación de la velocidad del sólido respecto a su valor medio debido a las colisiones. Sin embargo, las aproximaciones de la cinética clásica no incluyen el principio de

Navier Stokes sobre los fluidos incompresibles, por lo cual, se deben considerar ecuaciones distintas a las de Navier Stokes para poder integrar los aspectos termodinámicos de los flujos detríticos (Hutter *et al.* 1996). Dichas ecuaciones aún se mantienen sin resolver [20].

Adicionalmente, Iverson estableció que los esfuerzos debido a la fricción dominan el flujo detrítico, más allá de los esfuerzos debidos a las altas concentraciones o las colisiones [20].

La teoría desarrollada por Iverson y Denlinger (2001) para el flujo y deposición de los flujos detríticos se basó en los esfuerzos de fricción de Coulomb y en los esfuerzos desarrollados por la presión de los poros en el fluido. Para cuantificar la dinámica de la presión de los poros en el flujo realizaron experimentos a escala, utilizando para ello un canal rectangular de 88 metros de longitud y 2 metros de anchos inclinado 31° , seguido por otro canal de 7 metros de largo e inclinado $2,5^\circ$ (Iverson&LaHusen 1993). En las áreas donde el frente del flujo tenía una presión de poro del fluido igual a cero, calcularon un valor específico de presión de poro que era dependiente de la profundidad del flujo, de la difusividad hidráulica de la mezcla y la duración del flujo. Para modelar el flujo y la deposición del modelo tridimensional a una profundidad promedio, utilizaron las ecuaciones de momentum en dos dimensiones X y Y, y establecieron relaciones constitutivas con una cantidad de diferentes esfuerzos τ_s y τ_f de los sólidos y los poros del fluido [20].

En el modelo, Iverson asumió que el fluido estaba compuesto por agua y partículas con un diámetro inferior a 0.06 mm y que éste se comportaba como

un fluido newtoniano. La teoría fue probada usando arena seca derramada en el canal inclinado a 31°, obteniendo buenas aproximaciones entre los resultados experimentales y los resultados predichos por los modelos numéricos. De igual forma se obtuvieron resultados coherentes con los modelos numéricos respecto al tiempo de flujo y la profundidad de la deposición. Sin embargo, en el canal inclinado a 2.5° los resultados variaron respecto a lo predicho en los modelos numéricos [20].

O'Brien y Julien (1985) propusieron un modelo semi-reológico para la simulación del flujo y del proceso de deposición de flujos de lodo y flujos hiperconcentrados ricos en materiales finos. En dicho modelo, se consideraba a los tipos de flujo como bifásico, en donde una de las fases es el fluido en sí, compuesta por partículas finas y agua, y la otra fase es una fase sólida, compuesta por partículas de mayor tamaño. El modelo semi reológico propuesto para el estudio de ambas fases del fluido viene dado por la ecuación [20]:

$$\tau = \tau_y + \mu_B \cdot \dot{\gamma} + \xi \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

donde

τ_y es el esfuerzo de cedencia ,

μ_B es la viscosidad de Bingham para la fase fluida,

ξ es el parámetro dispersivo- turbulento

El parámetro ξ abarca dos esfuerzos. El primero es el esfuerzo turbulento inducido dentro de la fase del lodo y el segundo es el esfuerzo de inercia en el grano inducido por las colisiones dentro de la fase sólida [20]

O'Brien y Julien (1998) determinaron los parámetros τ_y y μ_B para una variedad de concentraciones de lodo tomadas de muestras obtenidas en diferentes áreas de las montañas de Colorado, mediante el uso de cilindros concéntricos en un reómetro estándar. Encontraron que ambos μ_B y τ_y se incrementan exponencialmente cuando se incrementa la concentración de sólidos C_v en una muestra. El ajuste reológico de la data experimental lo realizaron utilizando el modelo de Bingham [20].

Por medio del uso de diferentes sistemas reométricos Coussot (1992-1995) investigó la sedimentación de mezclas de agua con diferentes porciones de material fino ($d \leq 0.1\text{mm}$) y mezclas de agua con partículas finas y otras de mayor tamaño diámetro ($d \leq 20\text{mm}$) que componen los flujos viscosos detríticos en cinco zonas diferentes. Para ambas mezclas obtuvo las curvas de flujo (relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte), utilizando para ello el modelo de Herschel Bulkley. Coussot encontró que el índice de potencia del modelo usado era cercano a $n=0.33$ para ambas mezclas ensayadas. Por otro lado τ_y y k fueron encontrados dependientes de la concentración de sedimentos y de otras características, tales como la forma de las partículas y la distribución de las mismas dentro del fluido. Basado en dichos resultados, Coussot infirió que el modelo de Herschel-Bulkley es aplicable para el estudio de los flujos y procesos de deposición en prototipos de flujos detríticos. Adicionalmente,

Coussot *et al.* (1998) presentó un método en el cual se extrapolan los parámetros del modelo de Herschel-Bulkley para los prototipos de flujos detríticos ensayados a partir de las mediciones reológicas de las mezclas [20].

Los estudios realizados con flujos detríticos son desde el punto de vista bifásico, una mezcla de agua y sedimento. Sin embargo, en la realidad estos flujos están acompañados de otra serie de materiales sólidos que se encuentran en los lugares donde se producen. Uno de los materiales que más comúnmente es arrastrado por estos flujos es la madera proveniente de los árboles. El efecto de la madera en el flujo detrítico es poco entendido, y para evaluarlo Stephen Lancaster y Shannon Hayes utilizaron modelos empíricos y estocásticos junto con modelos físicos de tormentas, fuego, caídas de árboles, de iniciación de deslave y flujos. Éstos les permitieron estudiar la forma en la cual los flujos detríticos acumulan sedimentos en un área de dos kilómetros cuadrados sobre una cuenca de la Costa de Oregón, debido a la presencia o ausencia hipotética de la madera en el flujo. El modelo fue calibrado de manera que las distribuciones de sedimentos y la cantidad de madera en las simulaciones fueran similares a las medidas en la cuenca. Las observaciones realizadas en el campo y en la simulación les indicaban que la presencia de la madera en el flujo es una fuente importante de sedimentos. De este modo, gracias a los sedimentos, se evita que el flujo no alcance el final de la cuenca porque los sedimentos se depositan a través de todo el canal del flujo. Por el contrario, cuando el flujo se produce sin ladera los sedimentos se concentran al final del canal de flujo [16]

Savage y Hutter (1991) *et al.* (1995) estudiaron el comportamiento de mezclas granulares en presencia de agua, para lo cual realizaron experimentos

sobre un plano inclinado, el cual estaba formado por un canal rectangular dividido en tres partes, cada una de 10. La primera parte del canal poseía una compuerta que retenía el fluido de trabajo. Luego venía una zona de inclinación variable y, finalmente; una curva que unía la parte inclinada con la última parte horizontal. Las paredes del canal eran de plexiglás y la superficie del fondo de PVC para poder recubrirlo con diferentes materiales. La geometría del flujo, la velocidad, la presión y los esfuerzos generados fueron monitoreados durante los experimentos [19].

Como material granular utilizaron esferas de vidrio cuya densidad era 2860 kg/m^3 y con un diámetro de 3 mm. Adicionalmente, se utilizaron otras partículas en forma de disco que poseían una densidad de 5401 kg/m^3 , un diámetro de 4 mm y un espesor de 2.5 mm. Ambos materiales permitían variaciones en gravedad específica y en sus propiedades de impacto. El experimento fue realizado permitiendo que el fluido siguiera por el canal una vez que se liberaba la compuerta.

A medida que el fluido circulaba por el canal se tomaron fotos para determinar: la posición de la masa del fluido en el frente y el reverso de la onda, la longitud recorrida por el fluido, la altura que alcanzó el fluido una vez depositado y la velocidad del frente y reverso del fluido en el canal, así como también la influencia de la forma de las partículas usadas en el movimiento del fluido, y de la agitación de las mismas [19].

Las observaciones realizadas les permitieron determinar que existe una pequeña distorsión cortante dentro de la masa granular en movimiento, con un máximo en el fondo del canal. Los resultados de la experimentación fueron presentados en gráfica de longitud, velocidad del frente del fluido, velocidad del reverso del fluido, posición del frente y del reverso del fluido todos con respecto al tiempo. A partir de los resultados experimentales concluyeron que la masa en movimiento no es afectada por el ángulo interno de fricción de las partículas o la rigidez de las mismas y que la diferencia entre las formas en las cuales se depositó el fluido al final del movimiento se deben más a la forma de las partículas que a la densidad de las mismas [19].

Julián Aguirre, Alix Moncada y María Oliveiro pertenecientes al Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánicas de Fluidos del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de los Andes, (Mérida), realizaron estudios para determinar las características macro-viscosas y dispersivas que limitan el régimen de flujo de un fluido detrítico. Para ello consideraron las soluciones numéricas de los esquemas de MacCormack de continuidad y conservación de la masa. De igual forma estudiaron las características de deposición de la fase sólida de los flujos detríticos una vez que estos se detienen.

Los estudios fueron llevados a cabo para dos condiciones de flujo diferentes. Uno saturado en arena; el otro, formado por agua y partículas de plástico cuya densidad era de 1300 kg/m^3 . Las concentraciones en volumen del fluido variaron entre 15%, 30%, y 45%. Los experimentos se realizaron en un banco de prueba formado por un canal rectangular de 1 m de ancho, 8,2 m de

largo y con paredes de 10 cm de alto, dicho canal podía ser inclinado 3°, 6° y 8° [1].

Los estudios se realizaron considerando que el flujo detriticos era laminar [1].

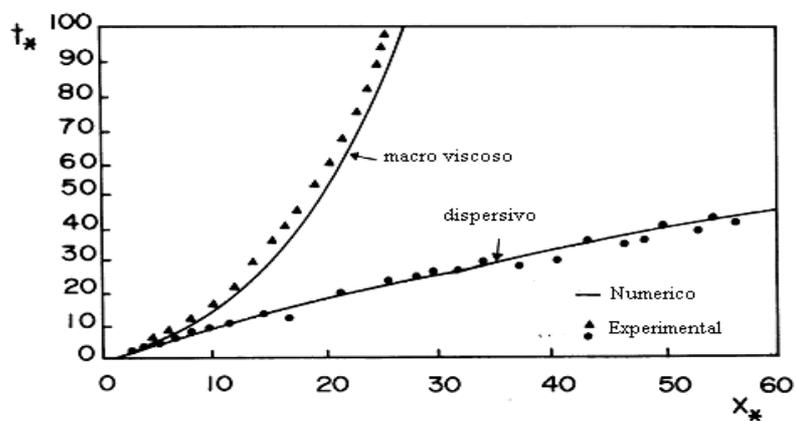


Figura 1.1 Desplazamientos de los frentes de onda laminar y dispersivos obtenidos del modelo numérico y del modelo físico obtenidos por Aguirre, J., Moncada, A. y Olivero M. [1]

La figura 1.1 muestra los desplazamientos de los frentes de onda laminar y dispersivos obtenidos del modelo numérico y del modelo físico. El eje de las abscisas representa la distancia recorrida por el frente de la onda relativa a la profundidad inicial del fluido en el recipiente. Por su parte, la magnitud del eje de las ordenas está dada por la expresión [1]

$$t^* = t(g \cos \theta / h_0)^{1/2} \quad (3)$$

donde

t es el tiempo en el cual fluye el fluido

θ es el ángulo de inclinación del canal

h_0 es la altura inicial del fluido dentro del recipiente

La velocidad del frente de la onda para el régimen dispersivo permaneció casi constante durante el período de estudio. Sin embargo, después de realizar la liberación del fluido varias veces, la velocidad de la onda comenzó a decrecer rápidamente. La figura 1.2 muestra las formas del fluido una vez depositado en el canal. La gráfica está representada por curvas de elevación constante que vienen dadas por la expresión $z^*=z/b$, en donde b es el ancho del canal [1].

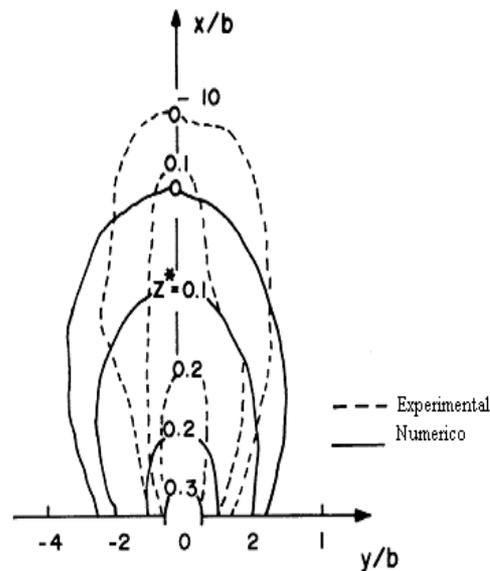


Figura 1.2 Curvas de elevación constante que indican la deposición numérica y experimental del fluido en el canal usado por. Aguirre, J., Moncada, A. y Olivero M.

Los resultados obtenidos les permitieron concluir que los flujos detríticos pueden ser modelados numéricamente, ya sea en una o en dos dimensiones, utilizando el esquema de MacCormarck, ya que las soluciones numéricas para el avance del frente de la onda y para la deposición del fluido son bastantes similares a las obtenidas en el laboratorio [1].

Además del estudio citado previamente, Aguirre Julián y Moncada Alix (2004), realizaron estudios sobre el comportamiento reológico y mecánico de los flujos de lodo y barro, con el fin de validar un modelo reológico cuadrático de flujos hiperconcentrados. Para ello, analizaron el flujo de mezclas homogéneas de arena y arcilla saturadas en agua. El modelo reológico propuesto incluía cuatro componentes de resistencia: la cohesión entre partículas, la fricción viscosa entre el fluido y las partículas de sedimentos, el impacto de las partículas y la turbulencia. La medición de las propiedades reológicas fueron realizadas utilizando un viscosímetro Rheomat 30. Dicho instrumento les permitió obtener la viscosidad, el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de las distintas mezclas [27].

Las concentraciones en volumen, tanto de la arcilla como de la arena fueron variadas durante la realización de los experimentos, lográndose medir cambios en las profundidades y en las velocidades del flujo mediante una simplificación unidimensional, la cual les permitió utilizar las ecuaciones de Navier Stokes. El flujo se estableció en un canal de plexiglás de 4m de longitud de pendiente variable, en el cual se retenía la mezcla mediante una compuerta que se retiraba súbitamente. La velocidad de avance del frente de onda se midió mediante filmación con una video-cámara que se desplazaba paralelamente al frente de onda. También fue grabado el paso de las ondas de lodo en tres

estaciones diferentes, lo cual permitió observar que el esfuerzo de cedencia es inversamente proporcional a la concentración de arena y directamente proporcional a la concentración de arcilla. El flujo establecido en el equipo experimental fue uniforme y permanente, y mostró ser un flujo de Bingham. El modelo cuadrático utilizado se ajustó muy bien con los experimentos realizados por Bagnold, Savage y McKeown y Govier [27].

Otros investigadores han realizado estudios con flujos detríticos, como el caso de Paolo Ghilardi, de la Universidad de Pavía; Fabrizio Savi, del Departamento de Hidráulica de la Universidad de Roma; María Pilar Brufau y Pilar García Navarro, del Centro Politécnico Superior de la Universidad de Zaragoza España, los cuales aplicaron un esquema de volumen finito para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan la dinámica de las mezclas de fluidos [12].

Para el estudio, consideraron fases líquidas y granulares, utilizaron dos ecuaciones de conservación de masa (una para la mezcla completa y la otra para la fase sólida) y una ecuación de momentum unidimensional. El término de fricción fue simulado de acuerdo con la investigación realizada por Takahashi (1991). Las ecuaciones utilizadas fueron resueltas mediante técnicas de volumen finito basadas en el esquema de primer orden de Roe (Roe, 1981; Alcrudo García-Navarro, 1992). El modelo utilizado fue aplicado para simular los experimentos en el laboratorio y eventos reales. El fluido usado estaba constituido por una fase sólida compuesta de partículas de gran tamaño y de agua como fluido intersticial, la densidad de la mezcla empleada fue determinada mediante la expresión: [12]

$$\rho = \rho_f [CS + (1 - C)] \quad (4)$$

donde

C es la concentración de sedimentos en la mezcla

ρ_s es la densidad de los sedimentos

ρ_f la densidad del agua.

$$S = \rho_s / \rho_f \quad (5)$$

Las simulaciones realizadas fueron hechas originando un flujo detrítico debido a erosión progresiva en un canal corto. Los resultados arrojados mostraron una buena reproducción del fenómeno gracias al modelo numérico [12].

El 16 de Diciembre de 1999 se produjeron una gran cantidad de flujos detríticos en las costas de Venezuela. Las zonas de Piedra Azul, Macuto, San Julián, Cerro Grande y Carmen de Uría se convirtieron en depósitos de algunos ríos que bajaron del cerro El Ávila. Simultáneamente, flujos detríticos de gran potencia ocurrieron a lo largo de 15 km. de costa causando pérdidas mayores a los dos billones de dólares y más de veinte mil pérdidas humanas. Los flujos que afectaron las costas venezolanas fueron mezclas formadas por altas concentraciones de rocas, grava, agua y tierra. Muestras de los sedimentos depositados por los flujos fueron analizadas por Wang Yuyo, del Instituto de Riesgos de Montaña y Ambiente, de China y Rodolfo Berrios, de la Universidad Central de Venezuela, con el objeto de observar el comportamiento

reológico del flujo en las zonas afectadas. Un primer análisis de las muestras dejó en evidencia que éstas estaban compuestas por partículas del cinturón ígneo metamórfico de la costa paralela venezolana, perteneciente a la formación mesozoica del viejo precámbrico. Luego, las muestras fueron cernidas y separadas de acuerdo al tamaño de las partículas en lodo y arcilla (<20 μm), arena (desde 20 μm hasta 2mm), y grava (>2mm). Una densidad de grano de 2,65 g/cm³ fue asumida, y conocidos el peso de los sólidos y el contenido de agua en la muestra, se computó la concentración en volumen de los sólidos mediante la expresión: (6)

$$\varphi = \frac{\rho - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (6)$$

Para la obtención de las curvas que muestran la relación entre los esfuerzos de corte y la tasa de corte se empleó un reómetro en forma de cilindro coaxial, y se asumió que la mezcla estudiada era incompresible, homogénea, y que se deformaba en forma continua durante las pruebas y que fluía en forma laminar. Adicionalmente, asumieron que existía una relación única entre el esfuerzo de corte en estado estacionario τ y la tasa de corte $\dot{\gamma}$

La cedencia de cada mezcla fue estimada mediante un análisis de regresión cuadrática de los esfuerzos de corte. Observando que la cedencia aumentaba al aumentar la concentración de los sedimentos, como lo muestra la figura 1.3 [12].

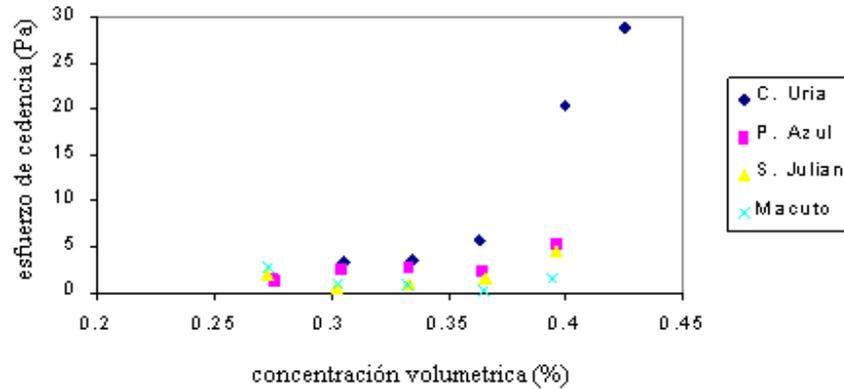


Figura 1.3 Esfuerzo de cedencia en función de la concentración volumétrica en distintas zonas del estado Vargas, Venezuela

Por otra parte, observaron que la viscosidad de varias de las mezclas no permanecía constante con la tasa de corte. Por el contrario, aumentaba al incrementarse la tasa de corte, exhibiendo un comportamiento no newtoniano tal como se muestra en la figura 1.4 [6].

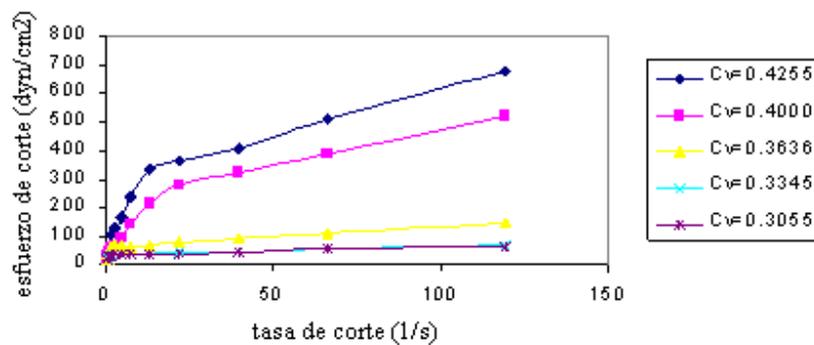


Figura 1.4 Curva de flujo para diferentes concentraciones de flujo detrítico depositados en Carmen de Uría durante la tragedia del año 1.999

Se observó, además, que para una tasa de corte que excedía los $13,28 \text{ s}^{-1}$ las muestras presentaron un comportamiento compatible con el modelo de Bingham [6].

Castillo Navarro, y Leonardo Franco. (2006) realizaron un estudio del comportamiento hidráulico de una quebrada en Perú, para lo cual emplearon el modelo numérico hidráulico FLO 2D versión 2003.

El estudio abarcó una etapa de recolección de información teórica referente a los fluidos newtonianos y no newtonianos, quebradas y del flujo de escombros que se produce cuando éstas crecen.

Para la aplicación del modelo FLO 2D, se utilizaron las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido en su expresión más completa, considerando para ello el fluido como homogéneo y de concentración invariable. Para los eventos de flujos de escombros se estimaron varias aproximaciones con diferentes concentraciones volumétricas. En todos los casos se estableció una rugosidad de Manning de 0.17 en el cauce y de 0.04 en la confluencia de la quebrada a estudiar.

Los parámetros reológicos del fluido fueron fijados en función de la similitud encontrada entre las muestras recolectadas de campo y las muestras tipo de la literatura. El tiempo de duración de la simulación fue de 32 horas. De los parámetros reológicos medidos experimentalmente concluyeron que la viscosidad dinámica y el esfuerzo de cedencia se incrementan con la concentración volumétrica de sedimentos.

Además mostraron que la aplicación de modelos numéricos arroja resultados que dependen de las suposiciones y simplificaciones que se hagan previamente. Por otro lado, recomendaron la utilización de modelos bidimensionales debido a que el movimiento del flujo hiperconcentrado dentro de los cursos de agua está sometido a bloqueos temporales de las secciones del flujo, variaciones continuas de las formas de estas secciones, cambios de concentración, etc., que no son consideradas en forma adecuada dentro de la estructura de modelos unidimensionales [7].

P.H.T. Uhlherr, J. Guo, T.-N. Fang y C. Tiu aplicaron la técnica del penetrómetro para la determinación del esfuerzo de cedencia de una mezcla de resinas solubles en agua y de una solución de dióxido de titanio (TiO_2). El estudio se basó en la medición del equilibrio estático de un cilindro (penetrómetro) dentro de un fluido estático. El esfuerzo de cedencia fue determinado mediante el balance de las fuerzas que actuaron sobre el penetrómetro una vez sumergido en el fluido. Los efectos del tamaño y peso del penetrómetro fueron considerados, observándose que las fuerzas de equilibrio se estabilizaban con rapidez. Por otro lado, los esfuerzos medidos con el penetrómetro fueron semejantes a los obtenidos mediante métodos convencionales, lo cual les permitió concluir que la técnica del penetrómetro es rápida, confiable y fácil de aplicar para la medición de los esfuerzos de cedencia de los fluidos [26].

María E. Bello, J.S. O'Brien, J.L. López, and R. García-Martínez simularon en dos dimensiones la inundación y el flujo de escombros del río Cerro Grande, ubicado en la región de Tanaguarena del estado Vargas en Venezuela, el cual afectó dicha región durante el mes de diciembre del 1.999.

El objetivo de la simulación fue proponer planes que permitiesen prevenir la ocurrencia de un evento similar en el futuro.

El estudio fue realizado en tres fases; primero se selecciono como período de estudio los días 14, 15 y 16 de diciembre del año 1.999. Seguidamente se investigó el volumen de agua que cayó sobre la región y la forma en que esta se distribuyo. Luego, fue estimado el flujo hidrográfico de los tres días utilizando para ello HEC-1.

Para realizar la simulación utilizaron el modelo FLO 2D, que les permitió observar el recorrido del flujo sobre el abanico fluvial. La utilización del modelo obtenido con FLO 2D permitió diseñar acciones para mitigar el flujo de sedimentos a través del río Cerro Grande, en el caso de que se produzcan lluvias intensas en un período dado.

Los resultados que se obtuvieron permitieron concluir que la mayoría del flujo de lodo que arrastró el río Cerro Grande se depositó en el abanico fluvial. De igual forma, se concluyó que el modelo FLO 2D puede ser utilizado para representar la crecida del río. [5]

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Fluidos reopéticos y tixotrópicos

Algunos fluidos precisan un aumento gradual en el esfuerzo cortante para mantener constante su velocidad de deformación. A estos fluidos se les denomina “reopéticos”. El caso contrario es el de los fluidos que requieren de esfuerzos decrecientes para que su velocidad de deformación se mantenga constante, y que se conocen como fluidos “tixotrópicos” [9]. Es decir, que los fluidos reopéticos incrementan su viscosidad en el tiempo a medida que se aplica sobre ellos un esfuerzo cortante constante, mientras que en los fluidos tixotrópicos la viscosidad del fluido disminuye con el tiempo cuando sobre ellos actúa un esfuerzo cortante constante. En ambos casos, la viscosidad vuelve a su valor inicial una vez que cesa la aplicación del esfuerzo [24].

2.2 Reometría

La reometría comprende todas aquellas técnicas utilizadas para la medición de las propiedades reológicas de un material. Debido a que el comportamiento reológico de un fluido depende de las características del flujo, se han desarrollado una gran variedad de pruebas empíricas, tales, como el penetrómetro y la prueba de Pashias para la obtención de algunas propiedades reológicas. Sin embargo, estas pruebas empíricas no aportan información suficiente relacionada con las ecuaciones constitutivas del fluido debido, por un

lado, a la complejidad en las condiciones del flujo. Por otra parte estos ensayos sólo registran una característica del flujo [8].

2.3 Análisis teórico.

2.3.1 Determinación de las ecuaciones de movimiento y ecuaciones constitutivas.

La ecuación que rige el comportamiento de un fluido no newtoniano se escribe en forma tensorial como:

$$\rho a_j = \rho G_j + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} \quad (7)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, a la aceleración, G es la gravedad y σ es el tensor de esfuerzos.

El desarrollo de la ecuación de Momentum arroja:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) &= \rho G_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) &= \rho G_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \\ \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= \rho G_z + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

Los modelos fenomenológicos representados por las ecuaciones constitutivas sólo muestran tendencias observables dentro de un rango de las condiciones de flujo y no propiedades físicas universales. La ecuación constitutiva más simple corresponde a la de los fluidos newtonianos. Este tipo

de ecuación constitutiva es utilizada para describir el comportamiento del aire, agua, aceites y algunos alcoholes. [8]

Dentro de los modelos utilizados para describir el comportamiento de los fluidos no newtonianos se tienen el modelo de Bingham, el de Herschel-Bulkley y el modelo de Casson

El modelo de Bingham viene dado por la ecuación:

$$\tau = y_p + p_v(\dot{\gamma}) \quad (9)$$

donde

τ es el esfuerzo de corte

$\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación

p_v es la pendiente de la curva de esfuerzo de corte contra la tasa de deformación

y_p es el esfuerzo mínimo necesario para que el fluido fluya

La función del modelo de Herschel-Bulkley, se expresa mediante la ecuación:

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (10)$$

donde

k es el coeficiente de consistencia de Herschel-Bulkley

n es el índice de Herschel-Bulkley

La función del modelo de Casson, viene dada por la ecuación

$$\tau^{0.5} = (\tau_y)^{0.5} + (\mu_c \dot{\gamma})^{0.5} \quad (11)$$

donde μ_c es el parámetro de viscosidad de Casson.

En todas estas expresiones los parámetros τ_c, μ_B K varían de un modelo a otro.

2.3.2 *Flujo no permanente unidimensional de un líquido confinado en un canal abierto*

Las ecuaciones que describen el flujo no permanente unidimensional de un líquido confinado en un canal abierto fueron desarrolladas por Jean Claude Barré de Saint Venant. Matemáticamente, estas representan la ecuación de continuidad y la ecuación de momentum, y están dadas respectivamente según:

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + VA_x^y = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_o - S_f) \quad (13)$$

En la cual x = distancia a lo largo del canal; t = tiempo; A = área de la sección; B = ancho del tope; V = velocidad media; y = profundidad del flujo; la g = aceleración de gravedad y S_o = pendiente del fondo.

El término A_x^y representa la salida del canal de forma prismática y se define como:

$$A_x^y = \frac{\partial A[x, y(x, t)]}{\partial x} \Big|_{y=\text{constant}} \quad (14)$$

La resistencia a la fricción, S_f definida para un fluido plástico de Bingham se expresa como:

$$S_f = \frac{2\eta V}{\gamma R^2} + \frac{\tau_y}{\gamma R} \quad (15)$$

donde η = viscosidad del barro; γ = peso específico del barro; R = radio hidráulico y τ_y = esfuerzo de fluencia del barro. El radio hidráulico, R , se define como:

$$R = \frac{A}{P} \quad (16)$$

En el cual P = perímetro mojado.

2.3.3 Flujo sobre un plano inclinado infinitamente ancho

Para las relaciones constitutivas se seleccionó el modelo correspondiente al flujo laminar uniforme de un fluido del tipo Herschel-Bulkley. La nomenclatura utilizada se indica en la figura 2.1

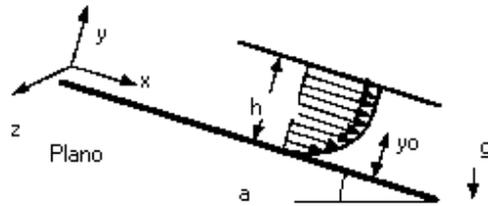


Figura 2.1 Perfil de flujo sobre un plano inclinado

Si se supone flujo bidimensional sobre un plano infinitamente ancho, las ecuaciones constitutivas se reducen a:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0; \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau(y); \quad p = p(y) \quad (17)$$

$$\tau = \varepsilon \left(\tau_c + K |\gamma|^n \right) \quad \text{cuando} \quad \gamma = \frac{du_x}{dy} \neq 0 \quad \left(\varepsilon = \frac{\gamma}{|\gamma|} \right) \quad (18)$$

$$|\tau| \leq \tau_c \quad \text{cuando} \quad \gamma = 0 \quad (19)$$

En estado estable, la ecuación del movimiento se escribe:

$$\frac{d(\tau)}{dy} + \rho g \sin \alpha = 0 \quad (20)$$

$$-\frac{dp}{dy} - \rho g \cos \alpha = 0 \quad (21)$$

Integrando, resulta:

$$\tau = -\rho g (\sin \alpha) y + A \quad ; \quad p = -\rho g (\cos \alpha) y + B \quad (22)$$

A y B son dos constantes que se determinan a partir de las condiciones de contorno en la superficie libre:

$$\sigma \cdot \hat{n} = p_o \quad (23)$$

donde n es el vector normal a la superficie y p_o es la presión atmosférica.

Finalmente se obtiene:

$$\tau = -\rho g(\sin \alpha)(h - y) \quad ; \quad p = \rho g(\cos \alpha)(h - y) + p_o \quad (24)$$

El esfuerzo cortante en la pared (τ_p) (en $y=0$) es por lo tanto igual a $\rho g(\sin \alpha)h$. Para $\tau_p < \tau_c$ no puede haber flujo. La máxima profundidad posible del fluido en ese caso, la cual es también la mínima profundidad (asintótica) de un flujo uniforme, es:

$$h_0 = \frac{\tau_c}{\rho g \sin \alpha} \quad (25)$$

Suponiendo que el fluido fluye hacia abajo y utilizando la ecuación del movimiento y la ecuación constitutiva conjuntamente con la condición de no-deslizamiento en la pared ($u(0)=0$), se obtiene, por integración, la distribución de velocidades en el fluido:

$$u(y) = \frac{\beta}{1+m} \left[y_0^{(1+m)} - (y_0 - y)^{(1+m)} \right] \quad \text{cuando} \quad y \leq y_0 \quad (26)$$

$$u(y) = u(y_0) = \frac{\beta}{1+m} y_0^{(1+m)} \quad \text{cuando} \quad h \geq y \geq y_0 \quad (27)$$

$$\text{con } m = \frac{1}{n}, \quad y_0 = h - \frac{\tau_c}{\rho g \sin \alpha}; \quad \beta = \left(\frac{\rho g \sin \alpha}{K} \right)^m \quad (28)$$

A partir de la distribución de velocidad aparece una región cerca a la superficie libre ($h \geq y \geq y_0$) donde el fluido no está deformado. Esta región es comúnmente llamada "tapón". Esta distribución de velocidad puede también expresarse en forma adimensional. La figura 2.2 muestra el perfil de velocidades.

$$V(Y) = (1 - (1 - Y)^{1+m}) \quad \text{cuando } Y < 1 \quad (29)$$

$$V(Y) = 1 \quad \text{cuando } 1 < Y < \frac{G}{G-1} \quad (30)$$

$$V = \frac{u(y)}{u(y_0)}, \quad Y = \frac{y}{y_0}, \quad G = \frac{\rho g h (\sin \alpha)}{\tau_c} \quad (31)$$

Perfil de velocidades para un flujo uniforme sobre un plano inclinado, para diferentes valores de n

- La distribución de velocidad es adecuada sólo cuando $G > 1$, esto es, cuando hay flujo
- El tapón comienza en $Y=1$ y su espesor es $1/G-1$
- Para un fluido dado, de un flujo a otro sólo varía el espesor del tapón

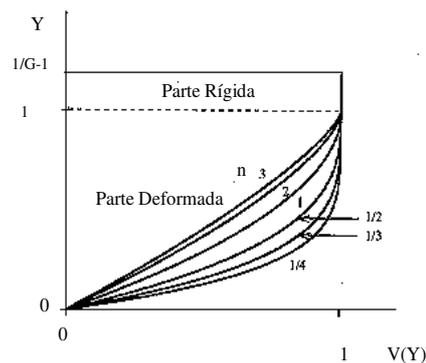


Figura 2.2 Perfil de velocidades para un flujo uniforme sobre un plano inclinado

2.4 Procesos gravitacionales

Por procesos gravitacionales se entiende a los movimientos pendientes debajo de rocas, regolitos y suelo bajo la acción de la gravedad. Se diferencian de los procesos erosivos en que éstos requieren de un medio de transporte como el agua o el viento. En la mayoría de las formas del paisaje, los procesos gravitacionales ocurren después de la meteorización. Una vez que la meteorización debilita y disgrega la roca, los procesos gravitacionales transfieren los derrubios pendiente abajo, donde una corriente actúa como una cinta transportadora que se los lleva. [24]

Los procesos dinámicos internos del planeta producen constantemente regiones con pendientes que favorecen el transporte de detritos por la acción de

la gravedad. En las regiones montañosas geológicamente jóvenes los procesos gravitacionales se producen con mayor fuerza, ya que los ríos erosionan en forma acelerada las montañas, produciendo regiones con pendientes muy pronunciadas. Con el tiempo, cuando el proceso de formación de las montañas cesa, los procesos erosivos y gravitacionales rebajan el terreno, es decir, que las pendientes escarpadas y accidentadas dan lugar a terrenos con pendientes menos pronunciadas [24].

2.5 Causas de los procesos gravitacionales

Antes de que se produzca un proceso gravitacional sobre el terreno actúan una serie de factores que lo van debilitando progresivamente, haciéndolo susceptible a la gravedad hasta llegar a un punto en el cual la fuerza de la pendiente no es suficiente para sujetar el terreno [24].

Entre los factores que desencadenan los procesos gravitacionales se encuentran: la saturación del terreno con agua, el exceso de inclinación, las vibraciones y la eliminación de la vegetación [24].

La saturación del terreno con agua hace que los poros de los sedimentos se llenen de agua, destruyéndose la cohesión que existe entre las partículas y permitiendo que deslicen unas sobre otras. Por otra parte, la saturación con agua produce un aumento de peso en el terreno favoreciendo el proceso gravitacional [24].

Los excesos de pendiente producen que las partículas granulares no consolidadas (como, por ejemplo, los granos de arena) adopten una pendiente estable llamada de “ángulo de reposo”. Este ángulo es el más empinado que el material granular puede tener sin perder estabilidad. Al aumentar el ángulo de reposo, los derrubios de rocas se mueven de manera de ajustar de alcanzar el ángulo de reposo nuevamente [24].

La eliminación de la vegetación sobre un terreno favorece el desencadenamiento de un proceso gravitacional, porque las raíces de las plantas protegen el terreno de la erosión y le dan estabilidad al terreno al unir el suelo con el regolito [24].

El fuego es otro agente que estimula acción de los procesos gravitacionales, porque, y dependiendo de la intensidad de éste, la parte superior del suelo se vuelve seca y suelta. Adicionalmente, el fuego puede crear una capa repelente de agua a poca profundidad, reduciéndose la infiltración y aumentando la escorrentía superficial [24].

Los terremotos pueden ocasionar procesos gravitacionales en lugares que presentan un terreno estable y que los materiales poco consolidados se mueven. De igual forma, los temblores pueden ocasionar que los materiales superficiales saturados en agua pierdan su resistencia y se conviertan en flujos por medio de un proceso de licuefacción [24].

Los procesos gravitacionales se pueden producir sin que intervenga algún agente externo. Esto se debe a que la meteorización al igual que la infiltración del agua debilita el material que constituye el terreno [24].

2.6 Clasificación de los procesos gravitacionales

Los procesos gravitacionales se clasifican según el tipo de material involucrado, según el tipo de movimiento y según la velocidad del proceso. De acuerdo al tipo de material este puede ser rocoso, es decir, que el material predominante son las rocas o puede ser derrubio, barro o tierra, en los cuales el material predominante son los regolitos y el suelo [24].

De acuerdo al tipo de movimiento los procesos gravitacionales se clasifican en: Desprendimiento, que representa una caída libre del material directamente sobre la base o golpeando otra parte de la pendiente. Este tipo de movimiento es fundamental para la formación y el mantenimiento del talud.

Otro tipo de movimiento son los deslizamientos, en los cuales el material se mantiene coherente y circula por vías definidas como diaclasas, fallas o planos de estratificación. Cuando se produce un desplome el material se mueve a lo largo de una superficie de ruptura curva. El tercer tipo de movimiento es el flujo, en el cual el material se mueve como un flujo viscoso saturado en agua [24].

La clasificación de los procesos gravitacionales con respecto a la velocidad es relativa, ya que el proceso se divide en rápido o lento sin que exista un límite entre ambos [24].

2.7 Tipos de procesos gravitacionales

2.7.1 Desplomes

Los desplomes son un tipo de procesos gravitacionales en donde la masa de roca o material no consolidado se mueve como una unidad a lo largo de una superficie curva, tal como lo muestra la figura 2.3 [24].

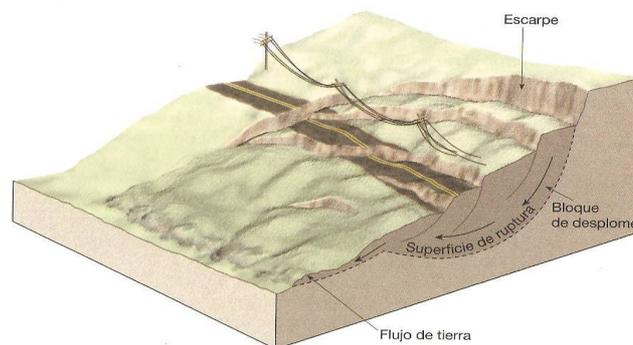


Figura 2.3 Representación gráfica de un desplome

Estos movimientos se producen en aquellas zonas compuestas por acumulaciones gruesas de material cohesivo, como la arcilla. A medida que se produce el desplome se crea un escarpe en forma de cuarto creciente en la cabecera. En algunos, la superficie superior del bloque se inclina hacia atrás,

dejando el terreno con una concavidad hacia arriba. Los desplomes, por lo general, implican el movimiento de varios bloques, pero existen casos que sólo involucran una sola masa del terreno. La inestabilidad de la zona afectada aumenta cuando se acumula agua entre la base del escarpe y la parte superior del bloque inclinado [24].

Los desplomes se producen por la pendiente excesiva del terreno. El material situado en la porción superior de la pendiente se mantiene en su lugar ya que es sostenido por el material que se encuentra en la base. A medida que el material de la base es removido lo que se encuentra por encima se vuelve inestable y responde a la fuerza de la gravedad [24].

2.7.2 Reptación

Es un tipo de proceso gravitacional que implica el movimiento descendente y gradual del suelo y el regolito. Un factor que contribuye a este proceso es la expansión y contracción alternante del material ubicado en la superficie debido a cambios pronunciados constantes de la proporción de agua presente. Cuando la cantidad de agua es alta y la superficie se encuentra húmeda, las partículas se elevan un ángulo recto con respecto a la pendiente. Cuando la superficie se seca las partículas que habían subido bajan, pero a un nivel inferior con respecto a su posición inicial [24].

La reptación es un proceso muy lento y su acción es imperceptible, sin embargo, se pueden apreciar con facilidad los efectos del proceso. Entre los

cuales, se pueden mencionar la inclinación de los cercados o los desplazamientos de muros de contención [24].

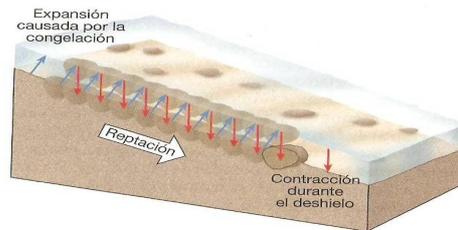


Figura 2.4 Esquema del proceso de reptación

2.7.3 Deslizamientos de rocas

Se producen cuando bloques rocosos se sueltan y se deslizan pendiente abajo. Se producen en aquellos ambientes geológicos en donde los estratos rocosos se encuentran inclinados, o en aquellos lugares donde hay diaclasas y fracturas paralelas a la pendiente. Estos movimientos se conocen también como “deslizamientos de derrubios”. La forma en que se producen viene dada por el socavamiento de la unidad rocosa en la base de la pendiente, por lo cual la roca pierde apoyo y acaba por desprenderse [24].

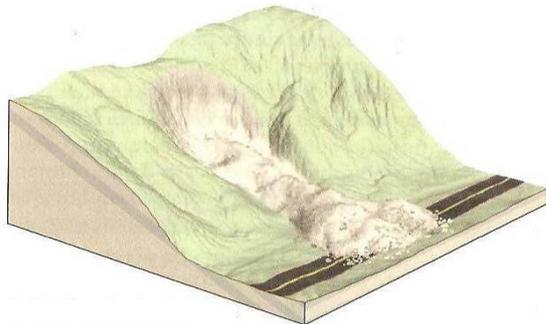


Figura 2.5 Representación gráfica de un deslizamiento de rocas

2.7.4 Flujos de tierras

Se forman en las laderas de las colinas de áreas húmedas durante épocas de precipitación abundante o deshielo. Cuando el agua satura el suelo y el regolito de la ladera de la colina el material tiende a desprenderse, dejando una cicatriz en la pendiente que forma una masa que fluye en forma de lágrima. Los materiales comúnmente implicados son ricos en arcilla y lima, conteniendo pequeñas proporciones de arena y granos gruesos. La alta viscosidad de los flujos de tierra hace que estos se muevan lentamente en comparación con los flujos detríticos [24].

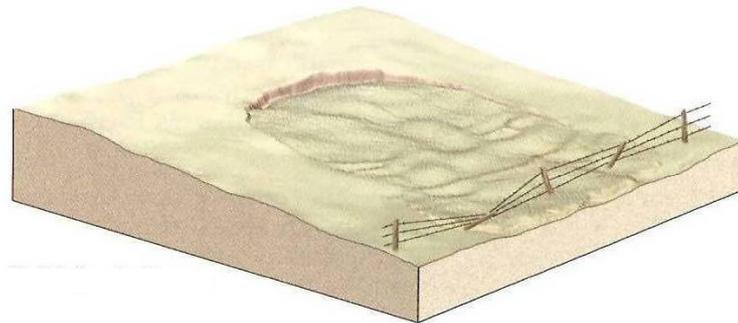


Figura 2.6 Representación gráfica de un flujo de tierra

2.7.5 Solifluxión

Se produce cuando el suelo se encuentra saturado con agua y la masa húmeda fluye pendiente abajo a una velocidad de algunos milímetros por día. Este proceso se manifiesta en aquellas regiones donde el agua no puede fugarse de la capa superficial saturada a través de la infiltración a niveles más profundos [24].

2.8 Flujo de detritos o de derrubios

Son una mezcla de agua y sedimentos con alta concentración. Debido a sus propiedades fluidas, estos flujos suelen seguir los cañones y los cauces fluviales de las regiones de alta montaña [7]. De acuerdo con Tarbuck Edward (2005), estos flujos son característicos de las regiones montañosas semiáridas y regiones volcánicas. En la literatura castellana se les conoce con distintos nombres (flujos o coladas de barro, volcanes, flujo de derrubios, coladas detríticas, aluviones, avalanchas de lodo o huaycos), y según sea la relación fase líquida fase sólida del flujo, su comportamiento es particularmente diferente.

El flujo detrítico posee una granulometría extendida con una cierta clasificación de los granos en su interior. Se dividen básicamente en tres partes: el frente, donde se acumulan los granos más gruesos; el cuerpo y la cola, donde se acumula parte del agua libre de sedimentos y el agua mezclada con sedimentos finos [7]. En la figura 2.7a y 2.7b se muestran, respectivamente los perfiles de un flujo detrítico típico y la morfología en planta de una zona que ha sufrido un deslizamiento de tierras que se convierte, al final, en un flujo detrítico. Se distinguen en ella tres zonas, la zona: de embudo o zona de iniciación, la zona de transición o zona de tránsito y la zona de depósito.

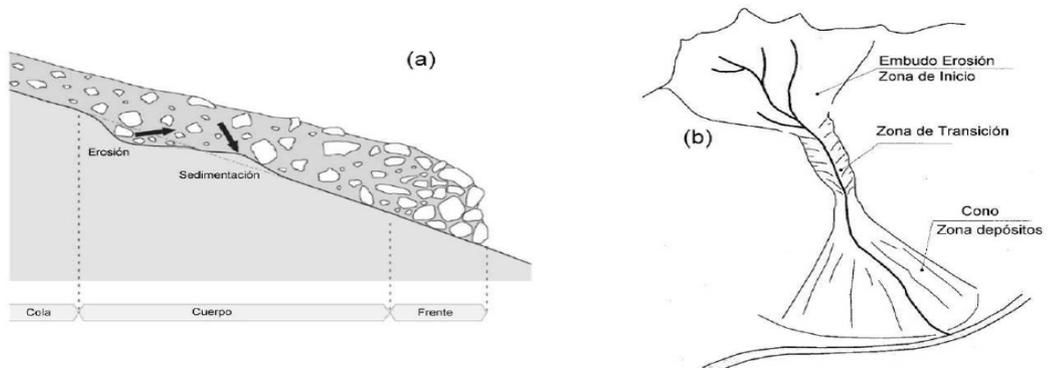


Figura 2.7a y 2.7b los perfiles de un flujo típico de detriticos y la morfología en planta de una zona que ha sufrido un deslizamiento de tierras que se convierte al final en un flujo detritico.

La concentración, el tamaño y la distribución de la fase sólida de los flujos detriticos son los parámetros relevantes para la determinación de las características de los flujos, mientras que otros parámetros como la forma de las partículas, el tipo de material, la inclinación del terreno por donde fluye el fluido son menos relevantes [20].

En los flujos detriticos, la relación entre la tasa de transporte de material líquido y sólido es baja, y puede llegar a ser cero en el caso de una mezcla granular seca. En contraste, en los flujos de sedimentos comunes, los sedimentos que transporta el flujo son manejados por la acción hidrodinámica que induce el fluido, siendo la relación de transporte entre el líquido y el material sólido alta, sin que exista un límite superior [2].

En los flujos detríticos, tanto el componente sólido como el líquido, dominan la física del movimiento, lo cual les da un poder destructivo único, y los distingue de las avalanchas y de las inundaciones; ya que la fuerza de los granos sólidos dominan la física del movimiento en las avalanchas y la fuerza del fluido dominan la de las inundaciones [14].

Existen diversas clasificaciones para los flujos detríticos. Usualmente los investigadores los clasifican de acuerdo con los mecanismos que dominan el flujo (Bagnold 1954, Iverson 1997, Bardou et al. 2003 e.g). Otros autores combinan los mecanismos con las concentraciones en volumen y el tamaño de los granos (Davies 1998, Coussot&Meunier 1996). La figura 2.8 muestra como, de acuerdo con las investigaciones realizadas por (Coussot&Meunier (1996)), se clasifican los flujos detríticos dependiendo de la concentración de los sedimentos y del contenido de material fino. Dicha clasificación distingue a los flujos detríticos de otros tipos de flujos naturales como los flujos hiperconcentrados, las avalanchas y derrumbes [20].

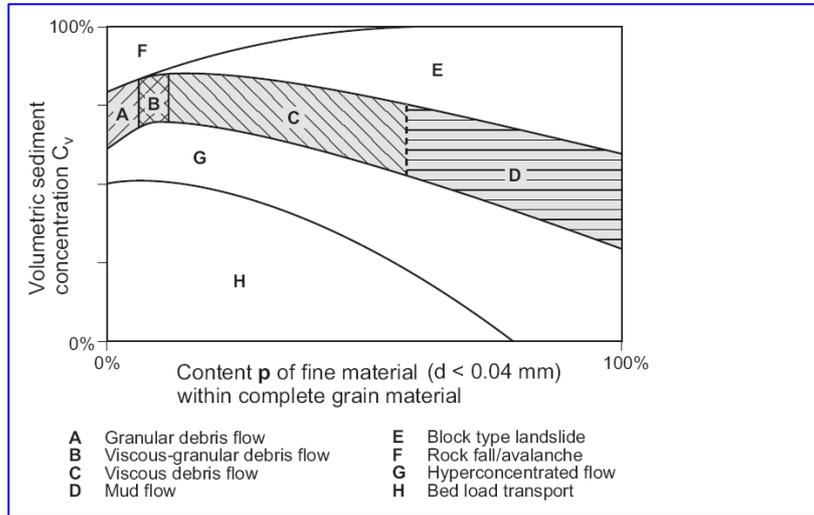


Figura 2.8 Clasificación de los flujos detríticos (A-D) y otros movimientos inducidos por la gravedad (E-H)

Los flujos detríticos granulares están compuestos de agua, con una pequeña cantidad de material fino y grueso. Y se dividen en dos fases: una constituida por agua y el material fino, y la otra, la fase sólida, formada por el material más grueso (Takahashi 1991, Iverson 1997). La mecánica de estos flujos está dominada por las interacciones entre el material grueso, las colisiones y la fricción entre las partículas más gruesas, y los poros del fluido.

En contraste, el flujo detrítico viscoso se comporta como una fase homogénea viscosa y el flujo de la mezcla es laminar. En estos flujos la concentración de sedimentos C_v es mayor que en los flujos detríticos granulares y el espacio entre las partículas de mayor tamaño es llenado por partículas de escala microscópica (fracciones de arcilla y otros materiales) y agua. [20].

Por su parte, si se compara el flujo de detríticos con el flujo de lodo, este último está constituido por una gran cantidad de material fino y una pequeña cantidad de material grueso. Los flujos de lodo también se dividen en dos fases: una de ellas, la fase fluida, que está constituida por agua y sedimentos muy finos, y la fase sólida, que se encuentra compuesta por las partículas de mayor tamaño. De acuerdo con la concentración de sedimentos, la profundidad del flujo y lo inclinado de la superficie, el flujo de lodo puede ser turbulento o laminar [16].

La concentración de sólidos C_s también ha servido para distinguir entre transporte de sedimentos ($C_s < 40\%$), flujos hiperconcentrado ($40\% < C_s < 70\%$) y corrientes de derrubios ($C_s > 70\%$) (Costa 1984) [4]. Existen otros criterios para la clasificación de los flujos detríticos que hacen énfasis en la distribución del tamaño de los granos que forman el flujo, la velocidad del frente del flujo, la tasa de esfuerzos y la magnitud de estos (Beverage and Culbertson, 1964; Vanes, 1978; Pierson and Costa, 1987) [14]

Davies (1988) propuso un esquema para determinar el comportamiento del flujo, basado en un flujo detríticos simplificado por medio de una mezcla compuesta de agua, material fino ($d < 10$ mm) y material grueso ($d > 6$ mm).

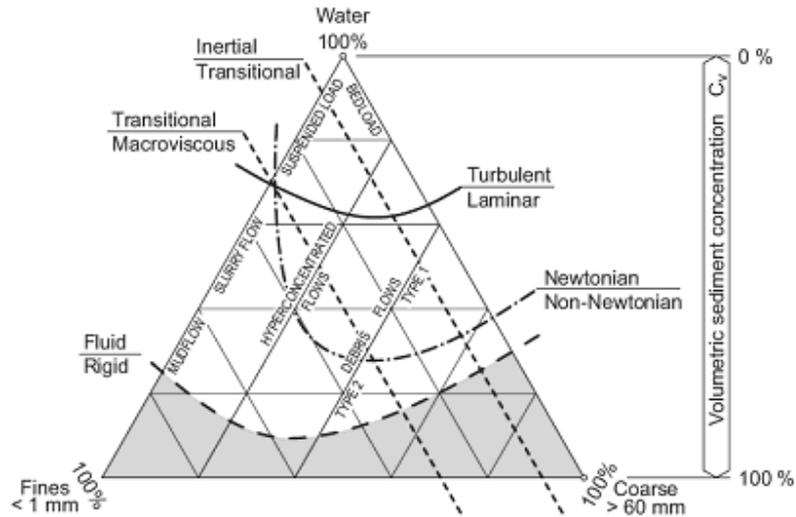


Figura 2.9 Características y clasificación de los flujos detríticos

De acuerdo con la figura 2.9 el flujo es turbulento para pequeñas concentraciones en volumen de sedimentos, mientras que para altas concentraciones en volumen el flujo es laminar. Para contenidos bajos de material fino los esfuerzos inerciales (turbulencia y las colisiones de las partículas) dominan sobre los esfuerzos viscosos del fluido, el cual está compuesto por agua y material fino. En contraste para un contenido alto de material viscoso, los esfuerzos viscosos dominan sobre los inerciales. Para concentraciones medias, bajas y contenidos pequeños de material fino el flujo detrítico se comporta como un flujo newtoniano, mientras que para concentraciones altas y grandes cantidades de material fino el flujo se comporta como no newtoniano [23].

La complejidad de las condiciones geológicas en cualquier terreno, y en especial donde se forman los flujos detríticos, originan diferentes tipos de flujo,

los cuales pueden cambiar de un tipo a otro. Por ejemplo, un flujo hiperconcentrado puede cambiar a un flujo detrítico o a un flujo granular, es debido a los cambios en la geología que provocan, a su vez, cambios en la concentración de sedimentos y fragmenta algunas partículas a lo largo del flujo [20].

De acuerdo con Pierson y Scott 1985; Takahashi, 1991; Wan y Wang, 1994; Coussot, 1997, el comportamiento reológico del flujo detrítico es una función de la concentración del sedimento, el tipo de sedimento y la distribución del tamaño del grano.

El comportamiento hidráulico del flujo de corrientes hiperconcentradas no es tratado con uniformidad por los investigadores, lo cual se evidencia en los distintos enfoques que al tema hacen Takahashi (1991), Wan y Wang (1994) y Coussot (1997). Por otro lado, la transición entre el flujo detrítico y una corriente hiperconcentrada no se encuentra adecuadamente comprendida, porque no se cuenta con un modelo teórico amplio que represente la transición de flujo de agua a flujo detrítico a medida que se incorporan sedimentos y tampoco se tiene un modelo que represente la transición inversa de flujo detrítico a flujo de corriente hiperconcentrada, a medida que el sedimento se detiene a cierta distancia de la fuente.

La mezcla de agua sedimento con cantidades despreciables de arcilla y limo, y concentraciones en la corriente de flujo hiperconcentrada con un rango de 20% al 60% por volumen, parecen exhibir un comportamiento newtoniano

de tipo turbulento (Pierson y Scott, 1985). Las partículas de grava y arena suspendidas en tales mezclas pueden asentarse aunque las velocidades de caída pueden verse reducidas. Las fases granular y fluida de estas mezclas actúan independientemente una de la otra durante el movimiento, por lo que estas mezclas son referidas como no homogéneas.

Con el incremento de las proporciones del tamaño de las partículas de limo y arcilla en la mezcla de agua y sedimento, las fuerzas de atracción electroquímicas entre las partículas de sedimento llegan a ser significantes (Pierson y Scott, 1985; Wan y Wang, 1994; Coussot, 1997). Esto se evidencia por la presencia de un esfuerzo de fluencia finito en la mezcla de agua y sedimento, cuya magnitud depende del tipo de arcilla, la fracción de arcilla y de la distribución total del tamaño de grano. Las mezclas de agua y sedimentos compuestas principalmente por limo desarrollan un esfuerzo de fluencia con una concentración en volumen en el rango de 30% al 35 %, mientras que las mezclas ricas en arcilla alcanzan un esfuerzo de fluencia con una concentración entre 20% y 30%

El flujo de una mezcla se convierte en un flujo detrítico cuando el esfuerzo cortante de la mezcla estática es lo suficientemente alto para mantener en flotación partículas de grava de diversos tamaños además de granos gruesos y finos. La mezcla fluye como un material plástico homogéneo, en el cual el agua no es el agente que transporta si no el fluido en los poros de la matriz granular saturada. El flujo de barros y escombros tiene, típicamente, una concentración por volumen mayor al 60%.

El flujo de barro y escombros con un esfuerzo finito de fluencia, generalmente, tiende a fluir en régimen laminar, aunque si la profundidad de flujo es lo suficientemente grande, se convierte en turbulento (Coussot, 1997). El comportamiento de régimen turbulento puede estar confinado al frente del flujo, mientras que el régimen laminar se manifiesta en el resto del flujo

2.9 Propiedades físicas de los flujos detríticos

Una suspensión de barro natural se conforma por agua y granos cuyos tamaños varían entre 0,1 μm y 10 μm . Desde un punto de vista estructural, los granos sólidos pueden ser divididos en dos grandes grupos, que dependen del rango de tamaño que posean. Estos grupos son: las arcillas con un tamaño de grano de hasta 2 μm y los granos con un tamaño mayor a 2 μm . La estructura de las partículas de arcilla es muy diferente a la de los granos, lo cual hace que las interacciones entre el agua y las partículas de arcilla sean diferentes a las interacciones entre el agua y los granos [8].

Cuando se estudian los flujos detríticos o la dinámica de los flujos de lodo, se busca conocer el comportamiento de las mezclas constituidas por agua y granos de varios tamaños. Estos tipos de mezcla son por lo general, suspensiones de granos gruesos en una dispersión coloidal (mezcla de agua y arcilla). Muchos de los materiales, tanto naturales como industriales, son considerados suspensiones de granos gruesos en dispersiones coloidales. [8]

Dentro de los componentes básicos de las suspensiones de lodo se tienen, el agua, la arcilla y los granos. El agua proviene de las montañas y contiene una cantidad de impurezas orgánicas, gases disueltos, iones y

moléculas en suspensión de acuerdo con el lugar de donde provenga. La fracción de agua absorbida por las partículas sólidas (tanto granos como arcillas) no se evapora a temperaturas menores a los 300°C y presentan una viscosidad elevada. El agua remanente se evapora completamente a una temperatura cercana a los 105°C. [8]

Las partículas de arcilla se originan en los procesos de desintegración de las rocas, seguido de una transformación química. Cada partícula de arcilla consiste en varias mono capas apiladas unas sobre otras. Para un determinado tipo de arcilla estas mono capas están formadas por una combinación fija de capas octaédricas de aluminio y oxígeno y capas tetraédricas de silicón y oxígeno. Dentro del enrejado de las mono capas, algunos átomos de aluminio y de silicón son reemplazados por otros que poseen una valencia menor y positiva, dejando la partícula con una carga negativa. Este proceso es compensado por la absorción de cationes como Ca^{2+} , Li^+ y K^{2+} los cuales son muy grandes para estar dentro del enrejado. [8]

Dentro del grupo de los granos, se incluyen varios tipos de partículas consistentes en minerales inertes y fragmentos de rocas, los cuales pueden ser fácilmente distinguidos por su tamaño. De acuerdo con el campo de aplicación, existen ligeras diferencias en cuanto a la clasificación del tamaño de grano.

La clasificación más simple establece que para un tamaño entre $2\mu\text{m}$ y $20\mu\text{m}$ se tiene limo. Las partículas con tamaños entre $20\mu\text{m}$ y $200\mu\text{m}$ son arena fina. Para tamaños comprendidos entre $0,2\text{mm}$ y 2mm se tiene arena gruesa. Si el tamaño está entre 2mm y 20mm es grava, los guijarros poseen un tamaño de

partícula entre 2cm y 20cm. Y si el tamaño de las partículas es mayor a 20cm se tienen rocas.

En términos de la estructura interna, la rugosidad de la superficie, la forma geométrica y dureza, se pueden tener otras clasificaciones de los granos que dependen de la historia geológica del material.

En general, el efecto reológico básico que provoca la presencia de los granos es el aumento de la viscosidad, ya que los granos ocupan un volumen determinado dentro de la suspensión y cuando se mueven chocan unos con otros. Sin embargo, en los casos donde la fracción sólida está muy próxima a la fracción máxima de empaquetamiento, la rugosidad, la dureza, y la forma geométrica se consideran despreciables al estudiar el movimiento de la suspensión [8].

2.10 Interacciones de los componentes de los flujos detríticos

Las moléculas de agua que forman parte de la suspensión interactúan entre ellas produciendo una transferencia de momentum en el movimiento relativo que se produce entre las partículas más cercanas. A gran escala, esta transferencia de momentum da pie a otra forma de interacción de tipo hidrodinámico. Es decir, que si el volumen de agua en movimiento es elevado ésta se puede considerar como un líquido homogéneo y viscoso.

Dentro de la suspensión, cuando la relación entre el diámetro de la molécula de agua y la del diámetro del grano es pequeña, la energía de disipación dentro del agua se puede considerar hidrodinámica [8].

Las partículas de arcilla que forman la suspensión pertenecen a una clase de partículas coloidales, cuyo rango de diámetro de partícula se encuentra entre 1nm y 10 μm . Cuando las partículas coloidales se suspenden en un líquido, se obtiene una mezcla que se conoce como “dispersión”. Las principales formas de interacción que se presentan entre las partículas de arcilla dentro de una dispersión son las fuerzas de atracción de Van der Waals y la fuerza de repulsión de Born. Otras fuerzas coloidales debidas a la hidratación o a la estructura de la partícula son despreciables dentro del estudio de flujos de lodo naturales. [8]

2.11 Introducción a las suspensiones reológicas

Las suspensiones reológicas son sistemas heterogéneos de dos fases conformados por una cantidad de partículas sólidas distribuidas en un líquido continuo. Para garantizar la continuidad de la suspensión y de la fase líquida alrededor de las partículas es necesario, pero no suficiente, que el orden de magnitud del diámetro de las partículas suspendidas sea intermedio entre el tamaño típico de los elementos intersticiales del fluido y de la longitud característica de la muestra de la suspensión como un todo [8].

Por otro lado, las propiedades reológicas son resultado de la transferencia de momentum debido a la interacción a escala mesocópica (escala en la cual las interacciones son encontradas). La intensidad de las interacciones pueden cambiar con el tiempo y las características del flujo, lo cual induce cambios es la resistencia del fluido. Los cinco efectos más importantes que permiten la transferencia de momentum son: el movimiento

Browniano, los efectos hidrodinámicos, los efectos coloidales y los efectos inerciales [8].

2.11.1 Efectos del movimiento Browniano

El movimiento Browniano es un movimiento aleatorio que se produce a partir del movimiento principal de las partículas como resultado del flujo de la suspensión. Al igual que la turbulencia, el movimiento Browniano tiene como principal efecto incrementar la disipación de la energía debido al movimiento adicional y relativo entre los diferentes elementos de la suspensión. Este efecto del movimiento Browniano sólo tiene relevancia para flujos muy lentos, cuando la energía de disipación debida a otras interacciones es pequeña [8].

Un segundo efecto del movimiento Browniano es la tendencia de desordenar la distribución espacial de las partículas. Adicionalmente, y debido a la dependencia del tiempo del movimiento Browniano en los procesos de difusión, este movimiento permite que las suspensiones concentradas recuperen sus propiedades iniciales después de un período de tiempo en reposo, como por ejemplo lo hacen los sistemas tixotrópicos de agua y arcilla. Ya que la difusión puede hacer que la dispersión vuelva a una condición aleatorio inicial que corresponda con un estado de equilibrio

2.11.2 Efectos Hidrodinámicos

Los efectos hidrodinámicos son la principal consecuencia de la presencia de partículas sólidas en un medio líquido, porque las partículas sólidas ocupan un volumen dentro del fluido. Desde un punto de vista general,

si el líquido que rodea a la partícula sólida no resbala sobre su superficie, el porcentaje de deformación dentro el líquido se incrementa con la concentración de sólido. Como consecuencia la viscosidad tiende a un valor infinito a medida que el factor de empaquetamiento se acerca a un valor máximo. [8]

2.11.3 Efectos de empaquetamiento

Los efectos de empaquetamiento pueden ocurrir en suspensiones coloidales si la concentración de las partículas sólidas es pequeña. Para una fracción granular de material dada, se pueden encontrar diferentes configuraciones de partículas y éstas pueden estar cerca o distantes unas de otras. Cuando la suspensión es muy concentrada el efecto de empaquetamiento puede llegar a afectar en forma drástica las interacciones que se dan en forma natural en el fluido [8].

Otro efecto de empaquetamiento es producido cuando la fracción de material sólido es tan grande que permite un contacto directo entre las partículas haciendo que estas se encuentren más juntas unas con otras. Esto es solo posible si hay suficientes fuerzas actuando sobre las partículas. Dentro de un empaquetamiento granular existe una presión específica debido al contacto de las partículas [8].

2.11.4 Efectos inerciales

Para las suspensiones existen dos clases de efectos inerciales que deben ser consideradas. La primera, la turbulencia, se observa dentro de una suspensión considerada como un fluido homogéneo con una viscosidad dada. En este caso, las ecuaciones constitutivas determinadas en condiciones

laminares dejan de ser validas, y la energía de disipación o la resistencia del flujo debe ser determinada a través de una serie de experimentos bajo condiciones diferentes.

La segunda clase de efecto que se debe tomar en consideración incluye tres tipos de efectos inerciales originados desde la estructura granular de la suspensión, y que son independiente de la turbulencia que se observa a nivel microscópico. Estos tres efectos inerciales son: la turbulencia que se produce dentro del fluido intersticial entre los poros de las partículas, las colisiones entre los granos y la fluctuación de velocidad de los granos a medida que se desarrolla el flujo.

Experimentalmente, es difícil distinguir un efecto de otro. Sin embargo, teóricamente el flujo de una suspensión se mantiene macroscópicamente laminar, mientras que a nivel microscópico se desarrolla una turbulencia dentro del flujo debido a la estructura de las partículas. [8]

2.11.5 Efectos Coloidales

Para partículas pequeñas que se encuentran suspendidas en flujos lentos varios tipos de fuerzas electroquímicas (coloidales) se hacen mayores que las interacciones hidrodinámicas. Los efectos coloidales son principalmente: las fuerzas de Van Der Waal, las interacciones de doble capa y los efectos repulsivos de Born. La particularidad de esta fuerza es que actúan entre las partículas que se encuentran relativamente separadas aún estando el fluido en reposo. [8]

La repulsión entre las partículas cercanas hace posible tener una suspensión estable la cual en estado de equilibrio posee una configuración de energía potencial mínima. Cuando la configuración es rota se requiere una cierta cantidad de energía para separar dos partículas inicialmente cercanas. Al comienzo del movimiento la distancia entre partículas puede ser pequeña permitiendo que interactúen entre sí en la nueva configuración que se alcanza durante el movimiento. Esta interacción se produce cuando una partícula cae dentro de la barrera potencial que se origina por el resto de las partículas que rodean a la primera, creando una especie de lazo entre las partículas que permite que la configuración inicial del fluido se restablezca. [8]

Bajo una condición dada de flujo, una cierta cantidad de tiempo es requerida para alcanzar el equilibrio. Los efectos tixotrópicos son inducidos por cambios en la configuración de la partícula. Adicionalmente, para deformaciones suficientemente pequeña de la suspensión las partículas que se encuentran cercanas se mueven relativamente una con respecto a otras sin salirse de la barrera potencial que estas crean induciendo efectos elásticos

Dispersiones coloidales con frecuencia exhiben un esfuerzo de cedencia tan pronto como la concentración se hace lo suficientemente grande. La razón de esto es que los lazos entre las partículas forman un medio continuo, el cual se rompe una vez que es aplicada una mínima fuerza. La estructura de estos sistemas dispersivos puede ser descrita utilizando la teoría de percolación.

Para una concentración pequeña, las partículas crean una estructura de grupo, pero cuando la concentración es mayor que el valor de concentración crítico correspondiente a el umbral de la percolación, se produce una estructura

en malla, en este caso los sistemas dispersivos se comportan como sólidos elásticos. Cuando las fuerzas externas son lo suficientemente alta o cuando se aplica sobre el sistema una tasa de deformación crítica se considera que la malla se rompe permitiendo que el fluido fluya. [8]

2.12 Reología de mezclas de agua y arcilla

Las suspensiones concentradas exhiben un comportamiento con esfuerzos de cedencia debido a la formación de una malla continua de doble capa solapadas una sobre otra. En las mezclas de agua y arcilla los efectos del movimiento Browniano son despreciables en comparación con los efectos coloidales. Para grandes tasas de corte los efectos hidrodinámicos pueden llegar a ser dominantes del flujo. [8]

En condiciones estables, las mezclas de agua presentan comportamiento plásticos, sin embargo existe documentación de comportamiento dilatante de estas mezclas (Beazley 1.965). Para comparar las propiedades de las suspensiones y predecir las características del flujo, lo mejor que se puede hacer es un ajuste de un modelo empírico de los datos experimentales y compararlos con los valores que corresponden a los parámetros del modelo. [8]

El modelo teórico más sencillo que se puede utilizar para describir los flujos plásticos es el modelo de Bingham. Sin embargo este modelo no puede ser ajustado para las curvas de flujo en todo el rango de las tasas de corte que se pueden probar, ya que muchas propiedades se llegan a obviar.

El esfuerzo de cedencia obtenido mediante el ajuste del modelo de Bingham no representa específicamente las cargas que actúan sobre la suspensión, sólo cuentan una cierta cantidad de disipaciones viscosas, las cuales dependen del rango de tasa de corte utilizado. Como consecuencia, se propone utilizar un ajuste del modelo de Herschel-Bulkley de los datos experimentales para todo el rango de tasa de corte. El modelo viene dado por la ecuación (10) [5].

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n$$

Donde τ es la magnitud del esfuerzo de corte, $\dot{\gamma}$ es la magnitud de la tasa de corte y τ_y , K , n , son parámetros positivos. Claramente, el valor del esfuerzo de cedencia es un valor empírico.

Usando el modelo de Herschel-Bulkley para los datos experimentales, incluyendo valores por debajo de 0,01s, obteniéndose un resultado del esfuerzo de cedencia bastante cercano al esfuerzo real. Sin embargo, aún no es claro si este modelo expresa un mecanismo físico dentro del material a medida que fluye. [8]

Erróneamente se ha considerado que el modelo de Bingham utilizado en las mezclas de agua y arcilla refleja la suma de la energía necesaria para romper las mallas de las partículas (esfuerzo de cedencia) y la disipación viscosa, al usar el segundo término como el esfuerzo del fluido newtoniano.

Para aclarar este error en forma simple se describe el fenómeno interno considerando que durante el flujo hay dos fuentes de energía de disipación, la primera es de ruptura y restauración de los lazos entre las partículas de arcilla

dentro del material y disipación hidrodinámica debida al agua en los intersticios.

Las partículas se organizan en forma de mallas (enlazadas unas con otras) cuando el fluido se mantiene un periodo suficientemente largo en reposo, una vez que el fluido comienza a moverse se crea una malla de transición en la cual la intensidad del esfuerzo de corte aplicado no se aleja mucho del valor del esfuerzo de cedencia. Cuando la malla deja de existir el esfuerzo cortante necesario para romper y restaurar cierto número de lazos de las partículas se aleja del valor del esfuerzo de cedencia.

Es decir que el esfuerzo no es la suma de una fuerza constante para romper la malla estática y de la fuerza necesaria para mantener el corte de la suspensión. De hecho tanto para el modelo de Bingham como el de Herschel-Bulkley el esfuerzo cortante total expresa una suma compleja de disipaciones viscosas relacionadas con la deformación de la malla de transición. [8]

2.13 Efectos de otros parámetros en el flujo de agua y arcilla

2.13.1 Efectos de la concentración

Para bajas tasas de deformación y concentraciones altas, los valores de la curva de flujo de las suspensiones de agua y arcilla presentan un comportamiento del tipo plástico el cual es atribuido a las interacciones coloidales.

Para altas tasas de deformación y concentraciones bajas, las curvas de flujos presentan una forma newtoniana. Adicionalmente si se tienen valores bajos de viscosidad las partículas se comportan como si estuviesen suspendidas en agua y libre de fuerzas [8].

2.13.2 Efecto el esfuerzo de Cedencia

Para grandes fracciones de sólido todos los autores han reportado un rápido incremento en los esfuerzos de cedencia en diferentes mezclas con diferentes concentraciones sólidas. Cuando la data experimental obtenida se encuentra dentro de un rango de fracción sólida relativamente pequeña, los autores suponen la Ley de la Potencia en donde el esfuerzo de cedencia incrementa con la concentración de sólido (Weymann et al. 1973, Thomas 1963, Michaels and Bolger 1962, Wang et al. 1994) [8].

El hecho de que se produzca un aumento del esfuerzo de cedencia con la concentración puede ser explicado considerando dos tipos de fenómenos. El primero es el incremento del número de interacciones entre las partículas y el segundo es el incremento de la intensidad con que se producen las interacciones entre las partículas [8].

2.13.3 Efecto de las propiedades elásticas

Para mezclas con fracciones de sólido bajas se han reportado incrementos del modulo de elasticidad con la fracción de sólido sobre un valor crítico. Esto corresponde a un proceso de percolación asociado con el esfuerzo de cedencia aparente [8].

Para una concentración de sólido mayor a una concentración crítica $\phi > \phi_c$ el comportamiento elástico de la suspensión se encuentra vinculado con la estructura de la malla. Y, por tanto, el modulo de elasticidad del fluido se

incrementa de forma potencial, donde el valor de la potencia depende de la dimensión fractal de los agregados. [8]

2.13.4 Efecto de la temperatura

Algunos investigadores han obtenido una variación de la viscosidad en las mezclas de agua y caolín dentro de un rango de temperaturas entre 0°C y 100°C (Coussot and Piau 1994, y Lapasin 1985), sin embargo otros autores como Ohgaki y Matsuo 1973 observaron una diferencia despreciable de la temperatura en las curvas de flujo.

Esta diferencia de opiniones puede ser explicada en función de las consideraciones hechas acerca de cuáles son los efectos predominantes del flujo. La temperatura es despreciable cuando se considera que la disipación hidrodinámica principalmente originada por el cortante de las capas de agua es despreciable; esto es cuando las interacciones coloidales prevalecen.

Los efectos de la temperatura son significantes solo cuando las interacciones coloidales comienzan a ser despreciables. Esto significa que durante el flujo los efectos coloidales dependen de la electroquímica resultante de las interacciones de las capas de agua. Durante el flujo, para tasas de corte suficientemente bajas, los valores de la curva de flujo son determinados por los procesos de restauración y ruptura de los vínculos entre las partículas [8].

2.13.5 Efecto del pH y de los electrolitos

Las características reológicas de las mezclas de agua y arcilla cambian significativamente con el pH y con los cambios electrolíticos. (Pazwash and Robertson 1971; Coussot and Piau 1994). Una gran variedad de cambios pueden ser observados dependiendo del tipo de arcilla y del tipo de cationes que esta posea.

Para mezclas de agua y caolín el esfuerzo de cedencia decrece a medida que aumenta el pH. Wang *et al.* (1994) observó que en las mezclas naturales de agua y arcilla con una fracción de sólido baja presenta un esfuerzo de cedencia alto cuando los cationes intercambiables son átomos de sodio Na⁺. Por otro lado, cuando la fracción de sólidos es alta el esfuerzo de cedencia se incrementa al aumentar los cationes monovalentes. [8]

2.13.6 Efecto del tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas es difícilmente considerado como un parámetro relevante, ya que los cambios en tamaño son acompañados por cambios en la forma, en la superficie y en las cargas eléctricas. Estas transformaciones inducen cambios mayores en la viscosidad que los que pueden ocasionar los cambios en tamaño de las partículas. [8]

2.14 Métodos no convencionales para la medición de esfuerzos de cedencia en fluidos hiperconcentrados

2.14.1 Prueba de Pashias

La prueba de Pashias ha sido utilizada exhaustivamente para evaluar la trabajabilidad del concreto fresco, pero hoy en día el uso de este método semi-empírico ha sido ampliado para investigar otro tipo de fluidos, sobre todo, para las suspensiones.

La prueba consiste en llenar un cilindro con el material a ser ensayado, colocando el cilindro sobre una superficie de manera tal que la boca del cilindro este sobre la superficie, luego se levanta el cilindro súbitamente y deja al material fluir bajo la acción de su propio peso.

El perfil final del montículo de material, así como también la diferencia entre las alturas inicial y final, pueden proporcionar una estimación del esfuerzo de fluencia. [20]

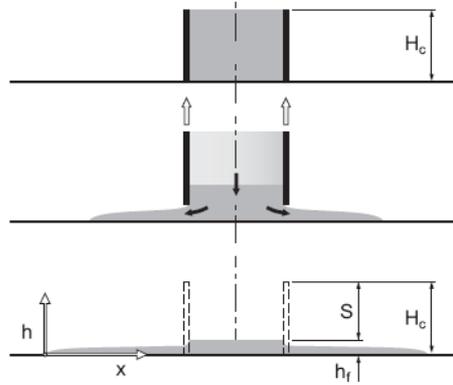


Figura 2.10 Principio de la prueba de Pashias

La obtención del esfuerzo de fluencia viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{S}{H_c} = 1 - 2 \frac{\tau_c}{\rho g H_c} \left(1 - \ln \left(2 \frac{\tau_c}{\rho g H_c} \right) \right) \quad (32)$$

donde

H_c es la altura del cilindro

h_f es la altura del perfil

ρ . Es la densidad de la mezcla

g es la gravedad

τ_c es el esfuerzo de cedencia

S es la diferencia de altura entre el perfil y la del cilindro

2.14.2 Medición del esfuerzo de cedencia estático por medio del penetrómetro.

Es un nuevo método que utiliza un penetrómetro cilíndrico para determinar de manera indirecta el esfuerzo de cedencia. El funcionamiento está basado en la medición de las fuerzas que actúan sobre el penetrómetro una vez que alcanza el equilibrio. El penetrómetro consta de un cilindro plástico hueco de punta esférica y un recipiente que contendrá la mezcla, cuyo diámetro debe ser entre cuatro a ocho veces mayor al diámetro del penetrómetro.

La prueba se realiza colocando la mezcla a ser estudiada en el recipiente. El penetrómetro se coloca en contacto con la superficie del líquido. Luego este se deja caer libremente sobre la mezcla, el penetrómetro se hundirá hasta que alcance un estado de equilibrio estático. En ese momento se mide cuanto se hundió el penetrómetro en la mezcla. La figura 2.11 muestra un esquema de un penetrómetro

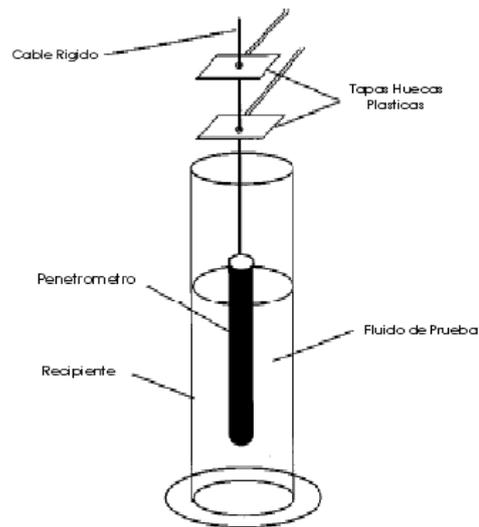


Figura 2.11 Esquema del penetrómetro

Al hacer un diagrama de cuerpo libre sobre el penetrómetro se obtiene

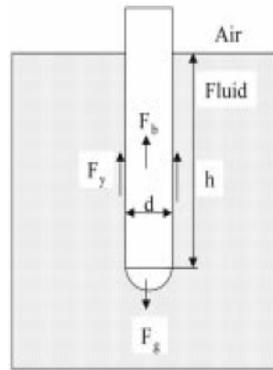


Figura 2.12 Diagrama de fuerzas sobre el penetrómetro

$$Fg = Fb + Fy \quad (33)$$

donde

Fg es el peso del penetrómetro

Fb es la fuerza debida a la resistencia a la flotabilidad

Fy es la fuerza debida a la resistencia al esfuerzo de cedencia del fluido.

Para el modelo del penetrómetro la ecuación (33) se expresa

$$m_p g = \rho g \pi d^2 \left(\frac{h}{4} + \frac{d_p}{12} \right) + \tau_y \left(\pi d h + \frac{\pi^2 d_p^2}{8} \right) \quad (34)$$

donde

m_p es la masa total del penetrómetro

ρ es la densidad del fluido

g es la gravedad

d_p es el diámetro del cilindro

h es la longitud del cilindro sumergida en el fluido

τ_y es el esfuerzo de cedencia

despejando de la ecuación (34) se tiene

$$\tau_y = \frac{g \left[m_p - \rho \pi d^2 \left(\frac{h}{4} + \frac{d}{12} \right) \right]}{\pi d \left(h + \frac{\pi d}{8} \right)} \quad (35)$$

Este método es utilizado ampliamente para medir propiedades reológicas de materiales de alta coherencia. Una de las primeras aplicaciones fue con los materiales de construcción como el cemento y el yeso. Es también utilizado en la industria alimenticia con mucha frecuencia.

2.14.3 Medición del esfuerzo de cedencia estático por medio del reómetro de bola

El reómetro de bola consta de un recipiente cilíndrico en donde se vierte la mezcla y una bola sujeta a un eje excéntrico como se muestra en la figura 2.16. [20]

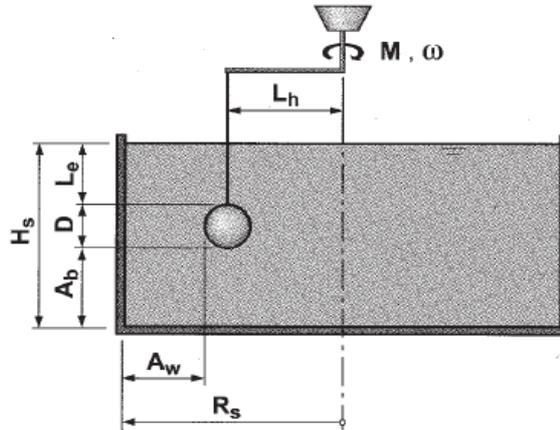


Figura 2.13 esquema del reómetro de bola

El principio de funcionamiento es el siguiente, se coloca la mezcla en el recipiente y se introduce la bola. Esta se hace girar y en función del torque aplicado se obtiene una estimación del esfuerzo de cedencia de la mezcla.

El modelo matemático en el cual se basa el reómetro de bola considera la teoría de Tyrach (2.000), la cual establece que existe una relación entre el esfuerzo de corte y el torque aplicado, así como también entre la velocidad angular y la tasa de corte, siempre que el flujo sea laminar. De acuerdo con esta teoría, el esfuerzo de corte se calcula empleando las siguientes ecuaciones [20]:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (36)$$

donde

C_D es el coeficiente de arrastre

Re es el número de Reynolds, el cual viene dado por:

$$\text{Re} = \frac{D\rho v}{\eta} \quad (37)$$

con

v es la velocidad de la esfera

D es el diámetro de la esfera

ρ es la densidad del fluido

η es la viscosidad dinámica del fluido

La formula general que determina la fuerza resistividad al movimiento de la bola es

$$F = C_D \frac{\rho v^2}{2} \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi \quad (38)$$

sustituyendo las ecuaciones (36) y (37) en la ecuación (38), se tiene

$$F = 3v\eta\pi D \quad (39)$$

el torque aplicado a la esfera viene dado por

$$M_1 = 3\pi\eta\omega DL_h^2 \quad (40)$$

Debido a la que la esfera rota por sí misma, producto de la inercia se define un segundo momento M_2

$$M_2 = \pi\eta\omega D^3 \quad (41)$$

el torque total viene dado entonces por

$$M = M_1 + M_2 = \pi\eta\omega(3DL_h^2 + D^3) \quad (42)$$

la viscosidad dinámica viene dada por

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (43)$$

De las ecuaciones (42) y (43) se obtiene

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{\pi\omega} \frac{1}{\pi\omega(3DL_h^2 + D^3)} M \quad (44)$$

que es el esfuerzo de corte del fluido.

2.14.4 Modelo físico reducido

El modelo físico reducido está formado por un reservorio y un canal rectangular y se utiliza para analizar el movimiento de un fluido después de una liberación repentina causada por el rompimiento del reservorio que lo almacena.

El canal rectangular al igual que el reservorio están hechos de material transparente (plexiglás) para permitir la visualización del fluido en todo momento.

La compuerta está sujeta en la parte superior por resortes que la empujaran hacia arriba simulando de esta forma el rompimiento de la compuerta. Sobre una de las paredes de canal rectangular hay una escala que permite medir la profundidad del flujo en el canal por medio de la marca que este deje cuando fluya.

El tiempo desde que el fluido es liberado hasta que se detiene por completo en el canal será medido utilizando un cronometro, con el objeto de determinar la velocidad que alcanza el fluido.

2.15 Caolín

El caolín es uno de los minerales de la arcilla. Proviene de rocas denominadas caolines, las cuales están constituidas por caolinita, haloisita, dickita y nacrita. Los caolines se forman por alteración de silicatos alumínicos de feldespato, en un ambiente cálido y húmedo.

La extracción del caolín implica la formación de suspensiones acuosas que se refinan por procesos de clasificación granulométrica en hidroseparadores (tanques de sedimentación, centrifugas o hidrociclones). El refinamiento puede ser realizado por varios procesos, entre los cuales están el tratamiento químico, la separación magnética de campo alto, la floculación con espuma, la deslaminación y calcinación.

2.15.1 Composición del caolín

La caolinita es un silicato alumínico hidratado con un grado muy bajo de sustituciones isomorficas. La estructura de la caolinita es la de un silicato del tipo 1.1 dioctaédrico, es decir, sus unidades estructurales laminares están constituidas por una capa tetraédrica y una capa octaédrica ensambladas al compartir los oxígenos apicales de la primera. Los cationes si se alojan en la capa tetraédrica coordinados con cuatro oxígenos y los cationes Al en la capa octaédrica coordinados con los oxígenos en la punta de los tetraedros y con grupos hidroxilos

El caolín posee un área superficial relativamente baja. Su morfología es cristalina, con tamaño de partícula fino y una amplia distribución de tamaños. La caolinita es blanda, refractaria, con una temperatura de fusión aproximada de 1850 °C en su estado la caolinita es de color gris, azul o negra debido a las impurezas.

El caolín es uno de los minerales industriales más versátiles en sus diversas aplicaciones porque es químicamente inerte en un rango de pH entre 4 y 9, su color natural es blanco, se utiliza como recubrimiento, no es abrasivo, posee baja conductividad térmica y eléctrica, es hidrofílico y se dispersa fácilmente en el agua

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Para predecir las características del flujo detríticos de forma experimental es necesario poseer una o varias muestras del flujo con diferentes concentraciones. Una manera de obtener la mezcla de los flujos consiste en añadir agua clara a las partículas de material granular de una muestra proveniente de una fuente natural o de una preparación artificial que muestre características similares

En este trabajo de investigación se utilizó una preparación artificial compuesta por una mezcla de caolín, conocida también como arcilla blanca o arcilla china, y agua clara para obtener una mezcla con propiedades similares a la de los flujos detríticos..

3.1 Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de la mezcla son caolín y agua clara. El caolín utilizado es industrial del tipo “C-6” (Blanco Gris Malla 400) presenta la siguiente composición química referencial

SiO ₂	65.08 %
Al ₂ O ₃	24.15 %
Fe ₂ O ₃	0.5 %
TiO ₂	Trazas
CaO	0.55 %

MgO 0.20 %

Perdida Rojo 4.82 %

La granulometría del caolín utilizado es:

Pasante _{Mesh 400 (TYLER)}= 99.1%

Retención _{Sobre Mesh 400}= 0.9%

El agua utilizada para preparar la mezcla fue agua destilada, perteneciente al laboratorio de termodinámica de la Escuela de Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela

3.2 Diseño y construcción del penetrómetro

El diseño del sistema del penetrómetro estuvo limitado por el diámetro del mismo. El diámetro del recipiente que contiene la mezcla debe ser mayor a cuatro veces el diámetro del penetrómetro para reducir los efectos de las fuerzas de arrastre que provienen de la pared del envase [26]. Como penetrómetro se utilizó una preforma de botellas plásticas cuyo diámetro externo de 2,8 cm y una altura efectiva de 10,2 cm como se muestra en el anexo :Figura A1

El sistema consta de un soporte universal en el cual a través de unas pinzas se sostienen unas láminas de acero de espesor de 3,4 mm, una longitud de 10,6 cm y 4 cm de ancho. Estas laminas poseen dos agujero:, uno de 5mm, por donde pasa la varilla del penetrómetro con la finalidad de mantener la trayectoria en línea recta del instrumento al realizar el ensayo. Y, un segundo orificio de 4,4 mm se utiliza para colocar una escala de 10 cm en donde se registra la longitud alcanzada por el penetrómetro al introducirse en la mezcla.

La barra que guía el penetrómetro en su carrera descendente es de madera balsa. Esta barra se encuentra sujeta a una tapa de plástico por medio de una unión de apriete. La tapa plástica va colocada en la parte superior del penetrómetro, de la misma forma que una botella plástica de refresco. Un alfiler es colocado en forma perpendicular a la barra. La aguja apuntará sobre la escala de 10 cm con el fin de facilitar la lectura de la altura sumergida.

Los materiales de la barra y la tapa del penetrómetro se escogieron con la finalidad de reducir la influencia de su masa en el ensayo. El recipiente que contiene la mezcla es un vaso de precipitado de 2000 cm³, el cual es colocado debajo del penetrómetro de manera que esté en contacto con la superficie de la mezcla, y que su centro coincida con la trayectoria del penetrómetro.

Para obtener diversas masas del penetrómetro, será llenado con arena y esferas de plomos. Al final, se tendrían cuatro penetrómetros. Las características de cada uno se muestran en la siguiente tabla:.

No	Diámetro (cm)	Masa (g)	Longitud Efectiva (cm)	Material
1	2,08	53	10	Plástico
2	2,08	128	10	Plástico
3	2,08	177	10	Plástico
4	2,08	275	10	Plástico

Tabla 3.1 Descripción de los penetrómetros utilizados en el ensayo

Los materiales fueron suministrados por la Escuela de Mecánica perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

Para aprovechar toda la altura efectiva del penetrómetro en cada ensayo, el vaso precipitado debe contener 1800 cm^3 de mezcla. Adicionalmente, el penetrómetro debe estar colocado al ras de la superficie de la mezcla antes de realizar el ensayo (26), por lo cual la regla se colocó a una altura en la cual la aguja indicase el cero de la escala cuando la punta del penetrómetro estuviese a la altura de la marca de 1800 cm^3 del vaso precipitado.

La regla se colocó entre las dos placas de aluminio, con el cero junto a la placa superior, de manera de leer directamente la profundidad alcanzada durante el ensayo

3.3 Diseño y construcción del reómetro de bola

El sistema está constituido por una estructura armada con ángulos de acero soldados. Sobre la estructura base se colocó una lamina de acero triada, cuyas dimensiones son 37 cm de largo, 31 cm de ancho y 0.38 mm de espesor. La estructura base es de 57,5 cm de largo, 31 cm de ancho y 37 cm de alto. La placa fue soldada mediante arco eléctrico a la parte superior de la estructura base.

Con un taladro la lámina de acero fue perforada con una mecha de $\frac{1}{4}$ " en el centro de la misma. Por este orificio fue introducida una barra de acero calibrada con un diámetro nominal de $\frac{1}{4}$ " y 20 cm de largo. Ésta posee una rosca de 3 cm de largo en un extremo y otra de 2 cm de largo en el otro.

En ambos extremos de la placa de acero triada fue soldada, mediante arco eléctrico, dos tuercas de $\frac{3}{4}$ ". Ellas serán previamente torneadas para permitir la entrada en apriete de rodamientos SKF R4Z de $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Estas rolineras se sujetaron en apriete la barra de acero de 20 cm de largo, de manera que ella atravesase la placa de acero. El extremo con la rosca de 3 cm se encontrará sobre la parte superior de la placa sobresaliendo 6 cm. La rosca de ese extremo será utilizada para sujetar una polea de 2,07 cm de diámetro y 0,97 cm de ancho mediante tuercas y arandelas colocadas a ambos lados de la polea.

Un disco de acrílico de 13,88 cm de diámetro y 0,94 cm de ancho con dos orificios de $\frac{1}{4}$ " uno en el centro y otro a 4,31 cm del centro será unido mediante tuercas a la parte inferior de la barra, de manera que coincida el eje central de la barra con el centro del disco.

En el otro orificio se colocó una barra de acero calibrada de $\frac{1}{4}$ " de diámetro nominal y 13 cm de largo, con roscas de 2 cm de largo en ambos extremos, sujetándola la barra por dos tuercas. En el extremo inferior de la barra fue roscada una esfera de plástico de 1,925 cm de diámetro.

En la parte de arriba de la placa de acero triada, se soldó un ángulo de largo igual al ancho de la placa, sobre el cual fueron abiertos mediante taladrado dos agujeros de $\frac{1}{4}$ " separados 2,07 cm, en los cuales se colocaron

dos poleas de 1,22 cm de diámetro y espesor de 0,59 cm. La altura de los agujeros serán medidas de manera tal que un cordón que pase por las tres poleas se encuentre horizontal al momento de tensarse. Las poleas se sujetaran mediante tornillos y tuercas. Una vez colocadas, se esmerilarán la cabeza de los tornillos para evitar que el extremo del cordón que cae tenga contacto con los tornillos.

El cordón a usar tiene una longitud de 2,12 m. Éste pasó a través de las tres poleas y en uno de sus extremos se colocará una masa fija de 0,20 Lb, y en el otro extremo masas variables de manera que bajen por la acción de la fuerza de gravedad, transmitiendo un torque a la barra que sujeta a la polea en el centro de la placa. Dicho torque hará girar a la barra y ésta a su vez al disco y la barra con la esfera en el extremo inferior.

Un recipiente de 2000 ml fue utilizado para colocar la mezcla a estudiar. El diseño del reómetro estuvo limitado por el recipiente, ya que la esfera debe estar sumergida en la mezcla. Por otro lado, al girar la esfera, éste debe mantenerse a una distancia mayor o igual a 1,7 cm de la pared del recipiente. Esto de acuerdo con la teoría de M. Schatzmann, G.R. Bezzola y H.E. Minor (2.003), que garantizó una relación lineal entre el esfuerzo de corte, el torque, la tasa de deformación y la velocidad angular de la esfera del reómetro.

La tensión del cordón necesaria para hacer girar la barra y al sistema completo se calculó mediante la ecuación

$$Tension = \frac{2m_1m_2}{m_1 + m_2} g \quad (45)$$

El torque aplicado a la barra viene dado por:

$$Torque = Tension \times r_p \quad (46)$$

donde r_p es el radio de la polea que está unida a la barra. El esfuerzo de corte en la mezcla viene dado por la ecuación (44)

3.4 Diseño y construcción del modelo físico reducido (canal)

El modelo físico reducido fue construido utilizando láminas de acrílico transparentes de 2 mm de espesor en las paredes y 5 mm de espesor en la base, con el fin de evitar deformaciones en el canal.

La base de tiene una longitud de 73 cm y un ancho de 12,4 cm. Las paredes del canal tienen una longitud de 60,8 cm y una altura de 12cm. El reservorio tiene una longitud de 12 cm, un ancho de 12,4 cm y una altura de 12 cm. La compuerta del canal tiene un espesor de 2 cm, una altura de 15 cm y un ancho de 12,4 cm.

Las paredes del tanque y las del canal se unieron a la base utilizando el adhesivo Poxi Bonder Loctite, el cual se escogió ya que es transparente, fragua en 4 minutos y una vez seca sella las uniones del canal y del tanque evitando así las fugas del fluido.

Las paredes del tanque y del canal están unidas a una platina de acero de espesor 4 mm y de ancho 1", por medio de tornillos y tuercas de 1/8" y el adhesivo Poxi Bonder Loctite. La platina mantiene las paredes del tanque y del canal separadas 2 mm. Esta distancia sirve de guía para la compuerta. Ella, en

la parte superior, posee dos agujeros separados 9,5 cm, en los cuales se sujetan dos resortes y estos resortes, a su vez, están sujetos a la platina de acero.

Sobre una de las paredes del canal se realizó una cuadrícula con cuadros de un centímetro con la finalidad de medir la altura inicial y final del fluido, además de la distancia recorrida una vez liberado.

3.5 Preparación de la mezcla

Para la todas las mezclas utilizadas se fijó una cantidad de volumen de solución (V) y la concentración ($\%C_v$). Todas las mezclas fueron elaboradas con base en concentraciones volumétricas. El porcentaje de agua se obtuvo mediante la siguiente expresión [25]

$$\%W = 100 - \%S \quad (47)$$

siendo

$\%W$ el porcentaje de agua que la mezcla debe contener para satisfacer la concentración impuesta.

$\%S$ porcentaje de solido que es la concentración en volumen.

$$\%S = C_v = \frac{V_{solo}}{V_{agua} + V_{solo}} \quad (48)$$

El volumen de caolín y agua a agregar en la mezcla se calcula a partir del volumen V fijado de solución mediante las siguientes expresiones. [25]

$$V_{solo} = \%S * V / 100 \quad (49)$$

$$V_{agua} = \%W * V / 100 \quad (50)$$

donde

V_{solo} es el volumen de caolín que la mezcla debe contener.

V_{agua} es el volumen de agua que la mezcla debe contener.

Utilizando la densidad del caolín se pudo obtener mediante la siguiente ecuación la masa de caolín requerida en cada mezcla. [25]

$$M_{caolin} = \rho_{caolin} V_{solo} \quad (51)$$

El caolín posee un porcentaje de agua $\%w$, el cual se considera del 1% por lo tanto la masa a pesar de caolín viene dada por la expresión [25]

$$M_p = (1 + \%w) * M_{caolin} \quad (52)$$

Por lo tanto, para mantener la concentración fijada se debe agregar una cantidad de agua que viene dada por la siguiente expresión

$$M_{agua} = (\rho_w * V_{agua}) - (\%w * M_p) \quad (53)$$

Una vez conocida la masa necesaria, se pesó en una balanza electrónica. Con un vaso precipitado de 2000 cm³ fue medida la cantidad agua utilizada. En un recipiente plástico de 18,5 litros (5 galones) se fue agregando agua y caolín a medida que éste era agitado con un batidor sujeto a la broca de un taladro el cual fue introducido a través de un agujero que poseía la tapa del recipiente. Este procedimiento se repitió hasta haber agregado a la mezcla toda la masa de caolín y agua requerida para cada concentración.

La fracción de caolín que se añadió varió en función de la masa de caolín medida. El caolín fue agregado por partes para evitar la formación de grumos en la mezcla

3.6 Ensayo del penetrómetro

El penetrómetro vacío se colocó en el soporte universal. Se tomó una muestra de 1800 cm³ de mezcla, que fue colocada en un vaso precipitado. El vaso se colocó debajo del penetrómetro, y éste se sostuvo manualmente, de manera tal que la superficie curva del penetrómetro estuviese al ras con la superficie de la mezcla

Luego el penetrómetro se dejó caer en forma vertical dentro de la mezcla. Se esperó un minuto hasta que el penetrómetro quedase en equilibrio. Una vez transcurrido el minuto, se procedió a medir la altura sumergida, la cual al ser sustituida en la ecuación (35) indicó un valor del esfuerzo de cedencia.

A continuación, se retiró el penetrómetro de la mezcla y del soporte universal para ser limpiado. La mezcla fue batida manualmente durante un

minuto y luego se dejó reposar durante otros diez minutos. Transcurrido el tiempo de reposo de la mezcla, se procedió a agregar arena dentro del penetrómetro, de manera tal que su masa fuese de 128 gramos repitiendo luego el procedimiento descrito.

Las mediciones de esfuerzo de cedencia fueron realizadas utilizando penetrómetro vacíos, penetrómetro con arena con una masa total de 128 gramos, penetrómetro llenos hasta la mitad y completamente con plomo con masas totales de 177 gramos y 275 gramos todas para una misma concentración.

Luego se retiró la mezcla del vaso precipitado y se colocó en un recipiente plástico tapado. Otra mezcla con una concentración de 35% Cv fue colocada en el vaso precipitado y se repitió lo anteriormente descrito para las mismas masas de penetrómetro. Las concentraciones utilizadas en este ensayo fueron de 30%, 35 %, 40 % y 45% todas volumétricas.

3.7 Ensayo de Pashias

Para la realización del ensayo se utilizó un cilindro sin tapas, plástico transparente de 10,83 cm de alto, 4,45 cm de diámetro interno y 5,1 cm diámetro externo. El cilindro se colocó en forma vertical sobre una superficie plana previamente limpiada y nivelada.

A continuación, se procedió a tomar la muestra ya preparada de agua y caolín al 30% y se agitó manualmente durante un minuto. Luego se llenó el cilindro con la mezcla. El cilindro se mantuvo fijo en su posición inicial, y se le

dieron golpes leves en las paredes laterales del cilindro para que la mezcla ocupase en su totalidad el volumen interno del cilindro. Una vez llenado el cilindro con una paleta se limpió la parte superior del cilindro de manera que la mezcla quedase al mismo nivel del cilindro. Luego se dejó reposar la mezcla en el cilindro durante diez minutos.

Transcurrido el tiempo de reposo, se procedió a levantar el cilindro lentamente utilizando un nivel como guía para garantizar un movimiento vertical. Una vez retirado el cilindro se dejó que la mezcla se asentara durante cinco minutos y luego se midió la altura a la cual se asentó la mezcla. El valor medido se sustituyó en la ecuación (32)

Mediante la aplicación de métodos de solución grafica del programa MatLab se obtuvo el esfuerzo de cedencia de la mezcla. La prueba se repitió un total de diez veces para la misma concentración en dos días. Luego utilizando concentración de 35 %, 40% y 45% Cv se repitió el procedimiento.

3.8 Ensayo del reómetro de bola

Para la realización del ensayo se utilizó un vaso precipitado de vidrio con capacidad de 2000 ml y la estructura diseñada para el reómetro. El vaso precipitado se llenó con las mezclas de agua y caolín al 25% C_v , 30% C_v , 33% C_v y 35% C_v en cada ensayo. El cordón fue colocado entre las poleas del sistema. En un extremo se ató una masa fija de 0,2 lb; en el otro extremo, se ataron otras cuyas masas variaban entre 0,2 lb, 0,5 lb, 1 lb y 2 lb, y que se combinaron de acuerdo con la mezcla ensayada

El vaso precipitado se colocó de manera que su centro coincidiese con el centro del disco acrílico que posee el reómetro. La cantidad de mezcla utilizada fue de 1700 ml para garantizar que la esfera estuviese sumergida totalmente. Una vez posicionado el vaso precipitado, se dejó reposar durante 5 minutos para que la mezcla se asentara.

La masa de mayor peso es colocada en la parte superior del reómetro y, una vez asentada la mezcla, las masas se dejaron caer. Utilizando un cronometro, se procedió a medir el tiempo de caída de las masas, a la vez que fue medido el numero de vueltas que realizó la esfera dentro de la mezcla, obteniéndose el numero de vueltas por segundo de la esfera, los cuales se transformaron a unidades de radianes sobre segundo (rad/s).z

Se procedió a tomar notas de la masa utilizada para hacer girar el sistema. Seguidamente se retiró la mezcla para ser batida manualmente durante un minuto y luego se dejó reposar durante otros cinco minutos. A continuación, se repitió el procedimiento utilizando masas mayores que permitiesen obtener velocidades angulares mayores. El procedimiento fue repetido para todas las mezclas ensayadas

3.9 Ensayo con el viscosímetro rotativo

Para la realización de este ensayo se utilizó un viscosímetro rotativo marca Fann modelo 35^a, perteneciente al laboratorio de fluidos de perforación de la Escuela de Petróleo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Dicho viscosímetro consta de dos cilindros concéntricos. El cilindro interior gira a diferentes velocidades. El procedimiento consistió en

colocar la muestra de la mezcla en el cilindro. Luego se colocó el cilindro interno sumergiéndolo hasta que la mezcla alcanzase el nivel indicado en este

A continuación, se accionó el viscosímetro y se hizo rotar el cilindro interno a una velocidad de 600 rpm, para después detenerlo y tomar nota de la lectura del dial que posee el viscosímetro. Posteriormente se retiró el cilindro interno y se dejó reposar la mezcla durante cinco minutos, luego se repitió el procedimiento pero haciendo girar el cilindro a una velocidad de 300 rpm. Una vez obtenidas las lecturas del dial del viscosímetro para ambas velocidades el esfuerzo de cedencia fue calculado mediante la ecuación:

$$\tau_y = 0,48 (2\text{Lectura a 300 Rpm} - \text{Lectura a 600 Rpm}) \quad (54)$$

Ensayo con el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300

Para la realización de este ensayo se utilizó un reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300, perteneciente a PDVSA- INTEVEP, con platos paralelos para evitar el deslizamiento de la muestra, manteniendo una temperatura controlada de 25 °C. Los esfuerzos obtenidos mediante este ensayo fueron medidos dentro de un rango de tasa de deformación entre 0,01 (1/s) hasta 5010 (1/s). La figura 3.1 muestra una imagen del reómetro utilizado.



Figura 3.1 Reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300

3.10 Ensayo con el modelo físico reducido

Para la realización del ensayo se utilizaron mezclas de 25% Cv y 30% Cv. El reservorio fue llenado con cada mezcla, dejando que esta se asentara durante cinco minutos. La compuerta se sostuvo manualmente durante ese tiempo. Una vez transcurrido los cinco minutos se soltó la compuerta, abriéndose el tanque en forma repentina y liberándose el fluido.

Una vez que el fluido alcanzó el reposo, se procedió a medir en la cuadrícula del canal la longitud alcanzada por este. Todo el experimento fue grabado con una cámara de video. El procedimiento se repitió para la otra mezcla. Se utilizó el editor de video Movavi Video Suite Movie Editor para medir el avance del fluido en intervalos de 0,033 segundos.

3.11 Análisis Numérico unidimensional

El modelo para la simulación numérica del flujo unidimensional de fluidos hiperconcentrados puede aplicarse a regiones geográficas cuya topografía en dirección normal al flujo, actúa para confinar al flujo. El canal puede ser no prismático, es decir, las propiedades de la sección transversal pueden cambiar con la distancia a lo largo de la dirección principal del flujo.

Matemáticamente, el modelo es representado por las ecuaciones básicas de conservación de masa y cantidad de movimiento para un medio continuo fluido. Este tipo de representación conduce a un par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales con las condiciones de contorno asociadas. Los términos no lineales en las ecuaciones, no permiten una forma cerrada de la solución.

Por esta razón, se desarrolló una solución numérica a través de la aplicación de la técnica del método del elemento finito Petrov-Galerkin a las ecuaciones que rigen el movimiento. Este método se programó en Fortran para proporcionar una solución discreta espacio-tiempo al problema. La solución se obtiene en forma de perfiles de profundidad y/o perfiles de caudal, en un tiempo fijo y un número de nodos especificados.

El término de resistencia a la fricción en la ecuación de cantidad de movimiento es modelado asumiendo que el lodo se comporta como un fluido plástico de Bingham. Este modelo ha sido verificado en el laboratorio mediante la utilización de un banco de ensayos de flujo no permanente en canales abiertos, (Rompimiento de presas de fluidos de tipo granular hiperconcentrado). El término de resistencia depende de la viscosidad del fluido, esfuerzo de

cedencia y peso específico del barro. Como una opción, la ecuación de Manning puede utilizarse en lugar del modelo de Bingham para simular flujos de agua clara.

El programa arroja como resultado archivos de salida que incluyen el desplazamiento del frente de onda con el tiempo, perfiles de profundidad, e hidrógramas del recorrido.

3.12 Calibración del modelo numérico Waraira Flow V.1.0

Para la calibración del modelo numérico es necesario obtener en forma experimental los valores del esfuerzo de cedencia de una o varios fluidos hiperconcentrados, así como también se hacen necesarios los resultados medidos al realizar ensayos en un modelo físico reducido.

Conociendo los datos reológicas de los fluidos, las dimensiones del modelo físico reducido, así como el tiempo y la distancia recorrida por el fluido durante el ensayo con dicho modelo, se procedió a ingresar los datos en el programa ajustando los valores de viscosidad, de manera tal que la distancia horizontal indicada por el modelo se ajustara a los valores obtenidos en forma experimental

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados mostrados a continuación se presentan en tres grupos. El primero de ellos corresponde a los resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales para determinar el esfuerzo de cedencia de las mezclas utilizadas y los resultados obtenidos mediante el modelo físico reducido. El segundo grupo corresponde a los resultados de la calibración del modelo numérico de simulación Waraira Flow V.1.0. Seguidamente, se presenta una comparación entre los resultados del modelo numérico y los obtenidos en el modelo físico reducido. Finalmente, se presenta el protocolo de ensayos elaborado para cada una de las pruebas experimentales realizada

4.1 Resultados Experimentales

Después del proceso de preparación de las mezclas se observó que el caolín se sedimentaba en el fondo del recipiente, dejando una capa de agua en la superficie, la cual era mayor a medida que la concentración de la mezcla disminuye. Por otro lado, después de realizar cada ensayo con el penetrómetro y con el reómetro de bola se observó que en las muestras ensayadas se formaba un camino por donde se movía el penetrómetro y la esfera del reómetro de bola, lo cual obligaba a agitar la mezcla y dejarla reposar antes de realizar un nuevo ensayo.

A partir de los resultados obtenidos con el ensayo del penetrómetro, mostrados en la tabla 4.1 se puede observar que a medida que la masa del penetrómetro se incrementa, la longitud que este se sumerge aumenta, sin importar la concentración de ésta. De igual forma, el esfuerzo de cedencia calculado aumenta para cada mezcla a medida que se incrementa la masa del penetrómetro.

Concentración %Cv	Penetrómetro	Altura sumergida (m) día 1	Altura sumergida (m) día 2	Esfuerzo de Cedencia (Pa) día 1	Esfuerzo de Cedencia (Pa) día 2
25	1				
	2	0,1	0,1	31,88	31,88
	3	0,1	0,1	81,112	81,112
	4				
30	1	0,0262	0,0257	50,573	50,759
	2	0,0532	0,0532	77,396	87,921
	3	0,0779	0,0784	79,363	100,384
	4	0,1	0,1	173,489	173,489
33	1	0,026	0,026	57,298	59,325
	2	0,0532	0,0532	118,521	118,511
	3	0,078	0,078	117,361	116,088
	4	0,1	0,1	171,122	171,122
35	1	0,0086	0,0089	202,389	197,39
	2	0,0337	0,0341	214,42	211,59
	3	0,0447	0,0442	248,63	251,84
	4	0,0647	0,0647	298,43	294,17

Tabla 4.1 Resultados obtenidos en el ensayo del penetrómetro

Adicionalmente, se pudo observar que las mezclas de agua y caolín con mayor concentración presentan un esfuerzo de cedencia mayor, resultados que se expresan en la tabla 4.2

Concentración %Cv	Esfuerzo de cedencia medido (Pa)	Desviación estándar
25	56,496	7,07
30	99,172	4,46
33	116,168	4,09
35	239,85	10,06

Tabla 4.2 Esfuerzos obtenidos con el ensayo del penetrómetro para mezclas de concentraciones de 25% Cv, 30% Cv, 33% Cv y 35% Cv

Los resultados obtenidos al realizar la prueba de Pashias con diferentes concentraciones de mezcla de agua y caolín mostraron, al igual que el penetrómetro, que el esfuerzo de cedencia se incrementaba al aumentar la concentración. Además se observó que a menor concentración, la distancia horizontal alcanzada por el fluido sobre la superficie aumentó y adicionalmente se incrementó la diferencia entre la altura inicial del cilindro y la altura final alcanzada por el fluido después de realizar el ensayo

En la tabla 4.3 se muestran los valores de esfuerzos obtenidos después de realizar la prueba de Pashias

Concentración % Cv	Esfuerzo de Cedencia (Pa)	Desviación estándar del esfuerzo
25	20,65	2,06
30	89	5,12
33	117,9	8,16
35	226,85	13,02

Tabla 4.3 Resultados obtenidos por la prueba de Pashias

De los resultados obtenidos con el reómetro de bola se observó que para las mezclas con concentraciones de 30% Cv, 33% Cv y 35% Cv hay un aumento del esfuerzo de corte proporcional al aumento del torque aplicado al eje del disco. Las tablas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 muestran los datos obtenidos durante el ensayo con el reómetro de bola para cada mezcla estudiada.

masa	kg.	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	τ corte(Pa)
1	0,454	5,337	0,015	192,885
2	0,544	18,637	0,016	198,396
3	0,68	20,746	0,016	204,231
4	0,771	41,201	0,016	207,098
5	0,907	43,036	0,017	210,42

Tabla 4.4 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 25% Cv

masa	kg.	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	τ corte(Pa)
1	0,771	3,668	0,016	207,098
2	0,907	16,535	0,017	210,42
3	1,134	24,448	0,017	214,317
4	1,361	33,963	0,017	216,996
5	1,588	41,067	0,017	218,951

Tabla 4.5 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 30% Cv

masa	kg	Velocidad angular (rad/s)	Torque (Nm)	τ corte(Pa)
1	0,907	2,813	0,017	210,42
2	1,134	16,076	0,017	214,317
3	1,361	22,351	0,017	216,996
4	1,588	28,56	0,017	218,951

Tabla 4.6 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 33% Cv

masa	kg	Velocidad Angular (rad/s)	Torque (Nm)	τ corte(Pa)
1	1,361	2,813	0,017	216,996
2	1,588	16,076	0,017	218,951
3	1,814	22,351	0,018	220,44
4	2,041	28,56	0,018	221,613

Tabla 4.7 Resultados obtenidos con el reómetro de bola para una mezcla de 35% Cv

A partir de los esfuerzos de corte calculados con el reómetro de bola se obtuvieron para cada mezcla los esfuerzos de cedencia indicados en la tabla 4.8

concentración (%Cv)	τ cedencia (Pa)
25	191,38
30	205,76
33	209,34
35	216,4

Tabla 4.8 Esfuerzos de cedencia obtenidos con el reómetro de bola

El viscosímetro rotativo utilizado presentaba un rango de medición tal que solo fue posible ensayar la mezcla correspondiente al 25 % Cv, obteniéndose un valor de esfuerzo de cedencia de 52,32 Pa

A partir de los ensayos realizados con el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300 perteneciente a PDVSA-INTEVEP, se obtuvieron las siguientes gráficas de esfuerzo de corte en función de la tasa de deformación para cada una de las mezclas ensayadas

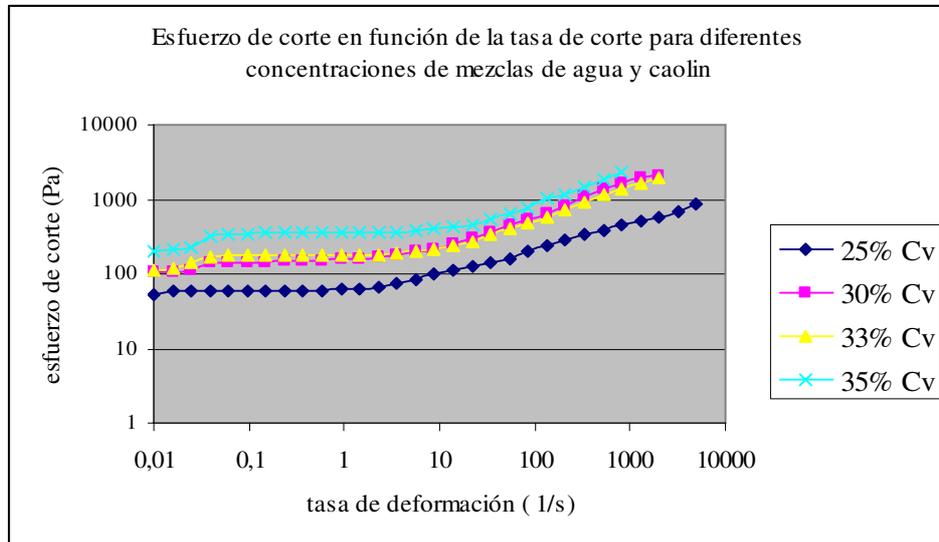


Figura 4.1 Gráfica del esfuerzo de corte en función de la tasas de deformación para mezclas de agua y caolín a diferentes concentraciones.

A partir de los datos graficados en la figura 4.1 se obtienen los esfuerzos de cedencia de cada mezcla ensayada al interceptar el eje de las ordenadas. Dichos esfuerzos se muestran en la tabla 4.9 para cada concentración estudiada.

Concentración (Cv)	Esfuerzo de cedencia (Pa)
25%	52,4
30%	109
33%	112
35%	202

Tabla 4.9 Esfuerzos de cedencia obtenidos a partir de los ensayos utilizando el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300

Al comparar los esfuerzos de cedencia obtenidos de los diferentes ensayos realizados a las mezclas, se observó que los correspondientes a los ensayos del penetrómetro, la prueba de Pashias, el viscosímetro rotativo y el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300 arrojan resultados similares. Por otro lado, se observó que los esfuerzos calculados con el reómetro de bola sólo se asemejan a los obtenidos en las otros ensayos cuando se utilizó una mezcla con una concentración en volumen elevada (35% Cv)

La gráfica 4.2 muestra los valores esfuerzo de cedencia para cada una de la mezcla estudiada, de acuerdo al ensayo utilizado

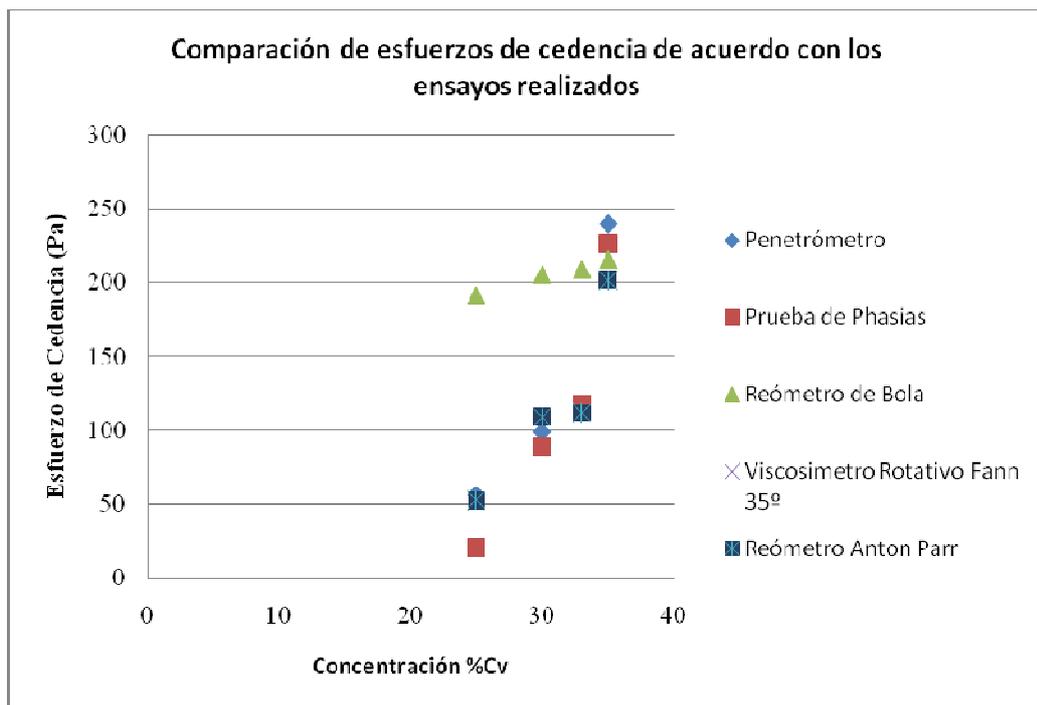


Figura 4.2 Gráfico comparativo entre los esfuerzos de cedencia obtenidos para cada concentración de acuerdo con el ensayo utilizado

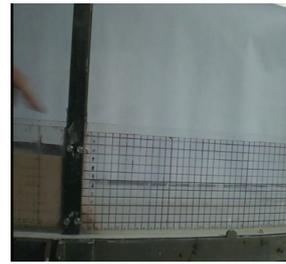
A continuación en las figuras 4.3 y 4.4 se muestran imágenes fotográficas correspondientes al estudio realizado con el modelo físico reducido para las mezclas de agua y caolín con concentraciones de 25% Cv y 30% Cv. Dichas imágenes muestran el avance del fluido cuando este se libera de forma repentina en el canal.



t = 0,00 s



t = 0,033 s



t = 0,066 s



t = 0,099 s



t = 0,132 s



t = 0,165 s



t = 0,198 s



t = 0,231 s



t = 0,264 s



t = 0,297 s



t = 0,33 s



t = 0,363 s

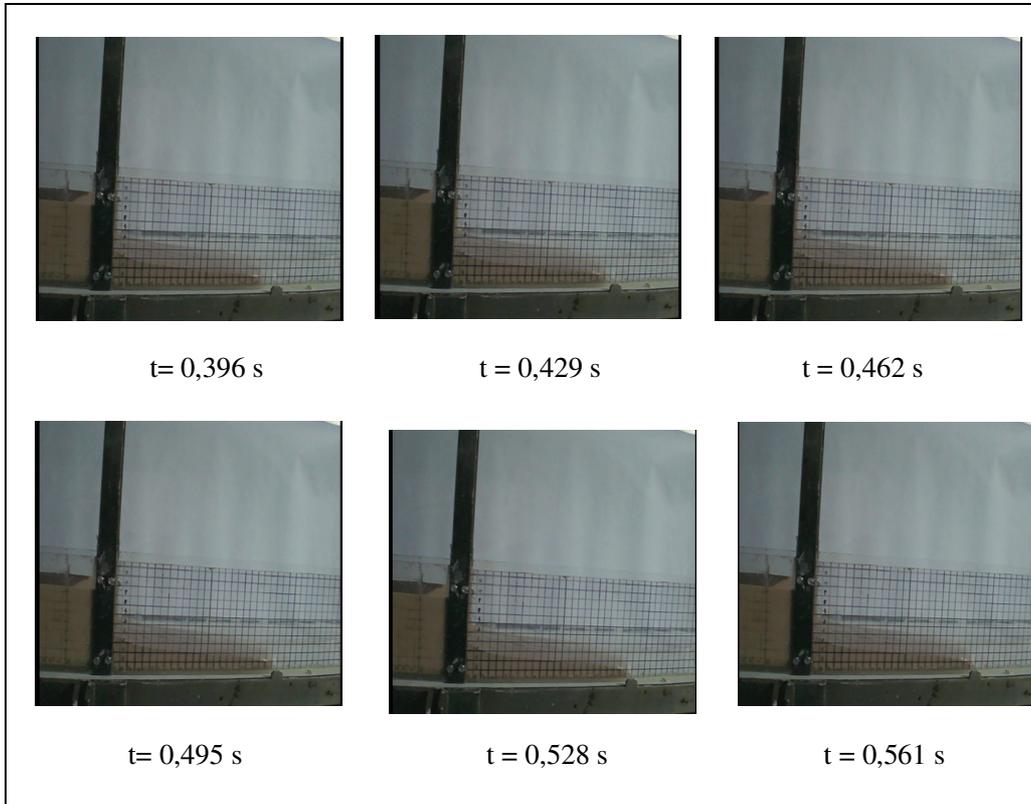
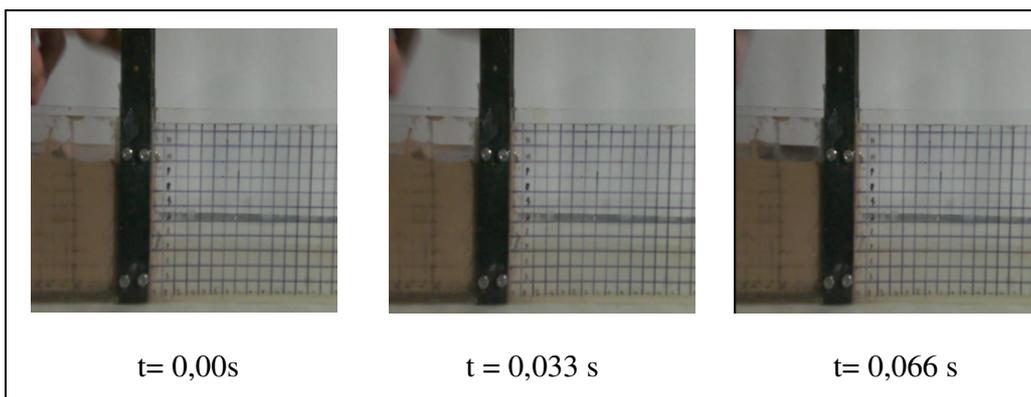


Figura 4.3 Imágenes fotográficas correspondientes al avance del fluido en el ensayo de la mezcla de 25 % Cv con el modelo físico reducido.



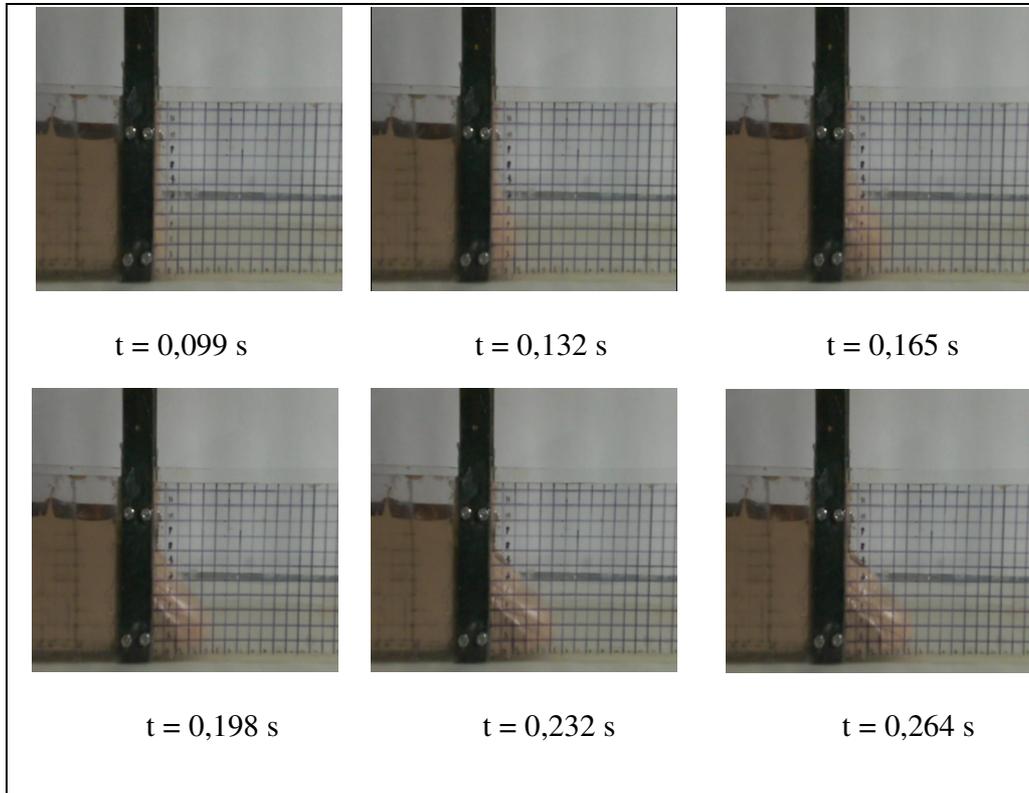


Figura 4.4 Imágenes fotográficas correspondientes al avance del fluido en el ensayo de la mezcla de 30% C_v con el modelo físico reducido.

En las figuras 4.5 y 4.6 se muestra la longitud alcanzada por el frente de onda del fluido en cada instante de tiempo durante el ensayo con el modelo físico reducido

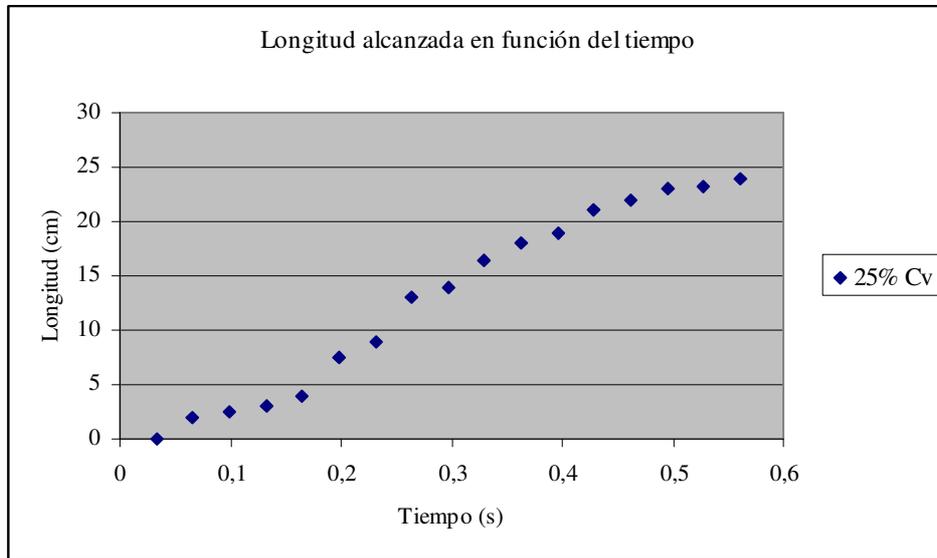


Figura 4.5 longitud alcanzada en función del tiempo durante el ensayo con el modelo físico reducido utilizando una mezcla de agua y caolín al 25% Cv

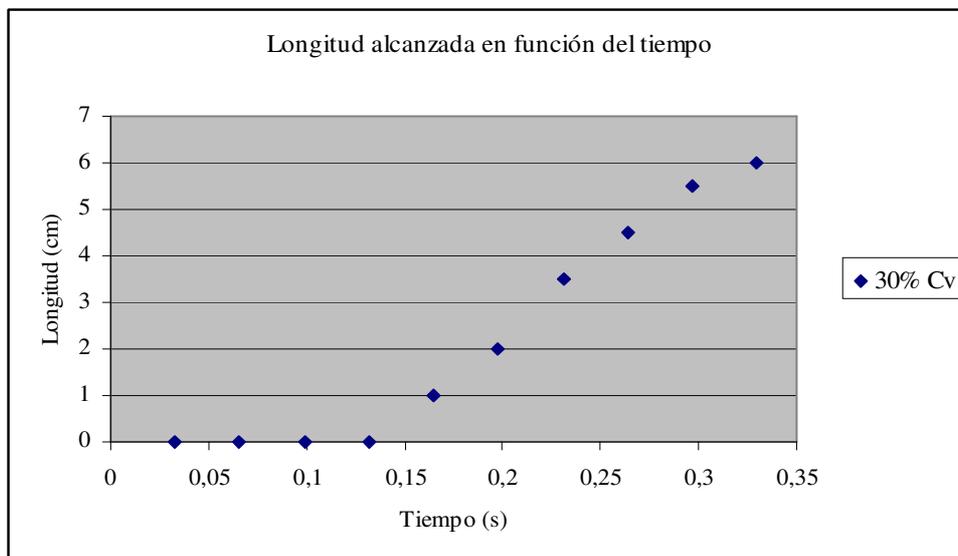
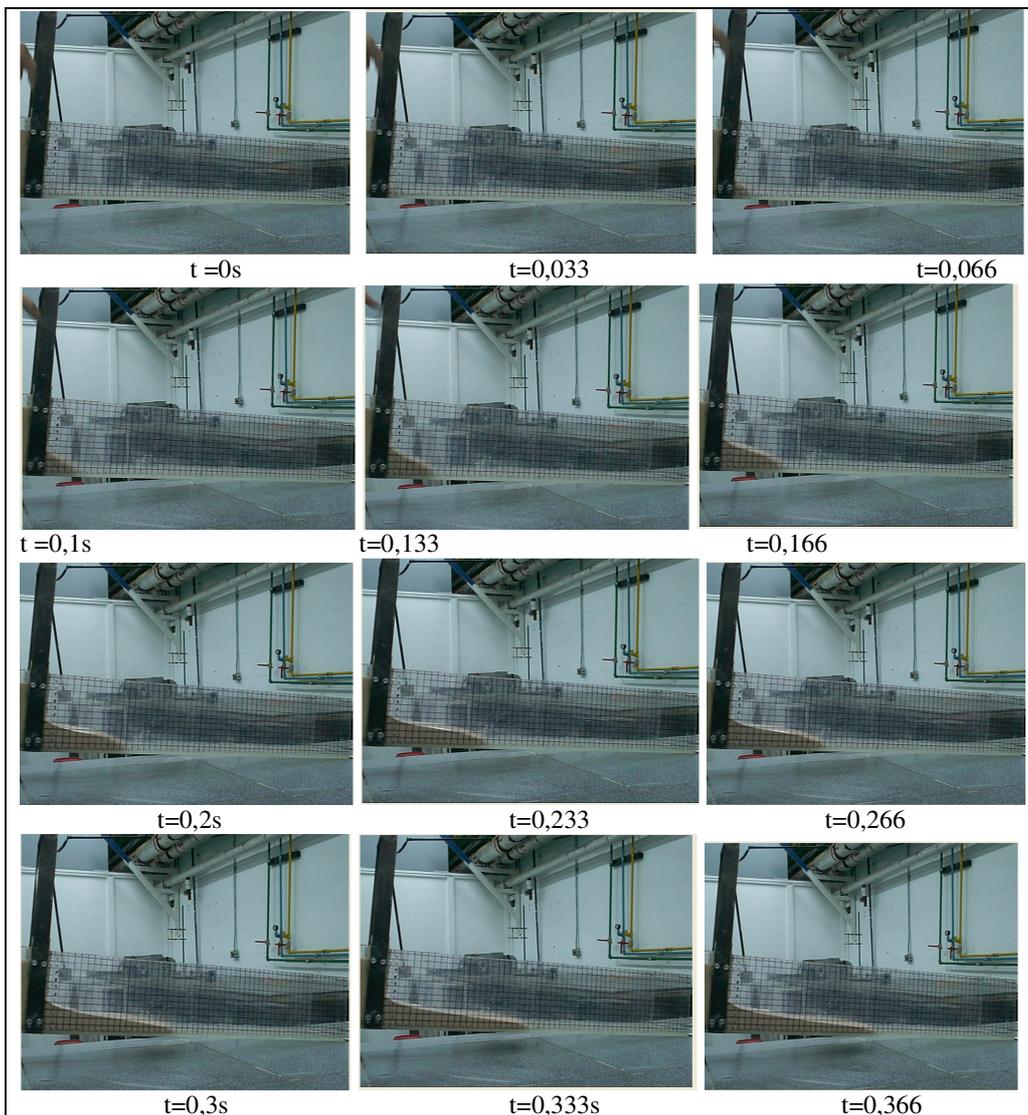


Figura 4.6 longitud alcanzada en función del tiempo durante el ensayo con el modelo físico reducido utilizando una mezcla de agua y caolín con 30%

En la siguiente secuencia de imágenes de la figura 4.7 se muestran imágenes fotográficas correspondientes al estudio en el modelo físico reducido para una mezcla hiperconcentrada del 25% en volumen, con una pendiente del 6%. La parte final del reservorio esta elevada 7 cm (0,23 pies) y la compuerta ubicada en el origen de coordenadas a una altura de 5,67 cm (0.18 pies)



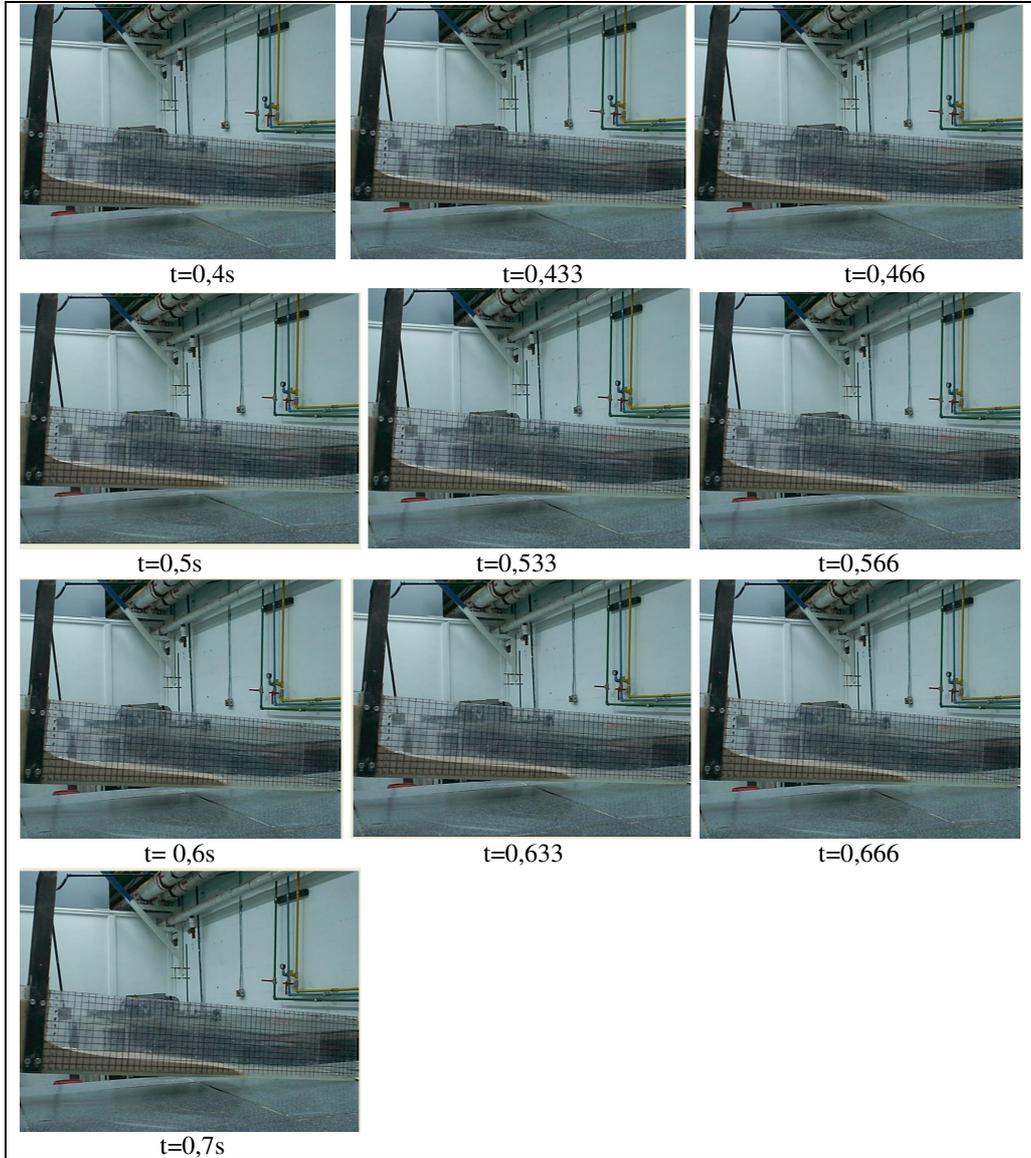
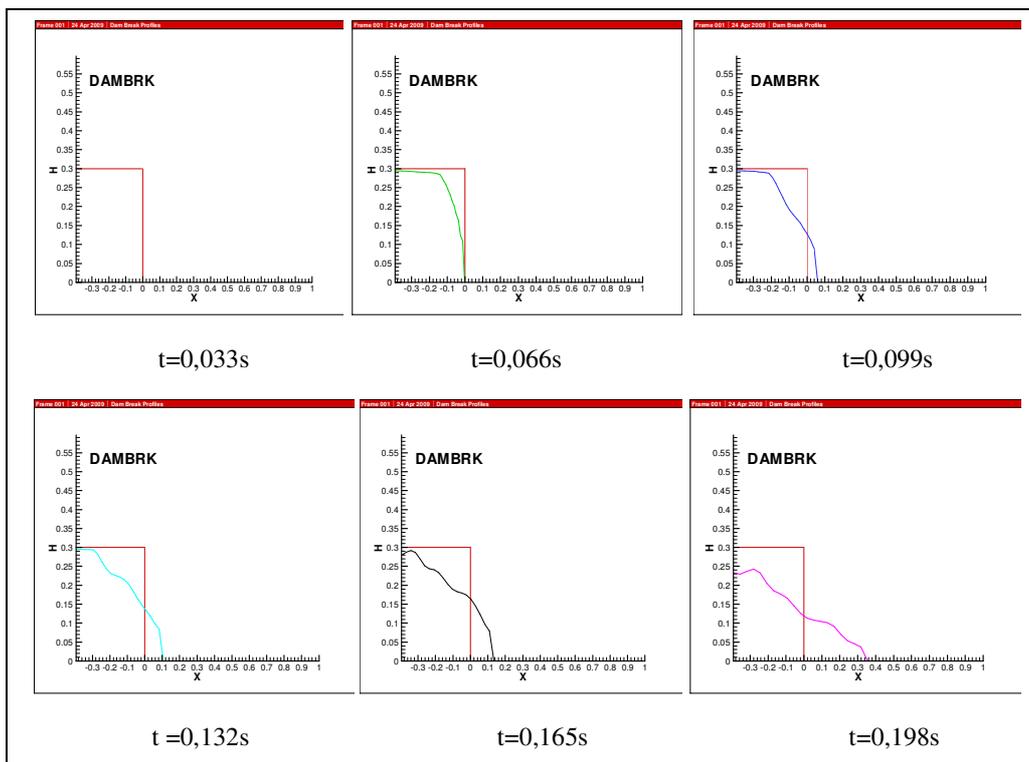


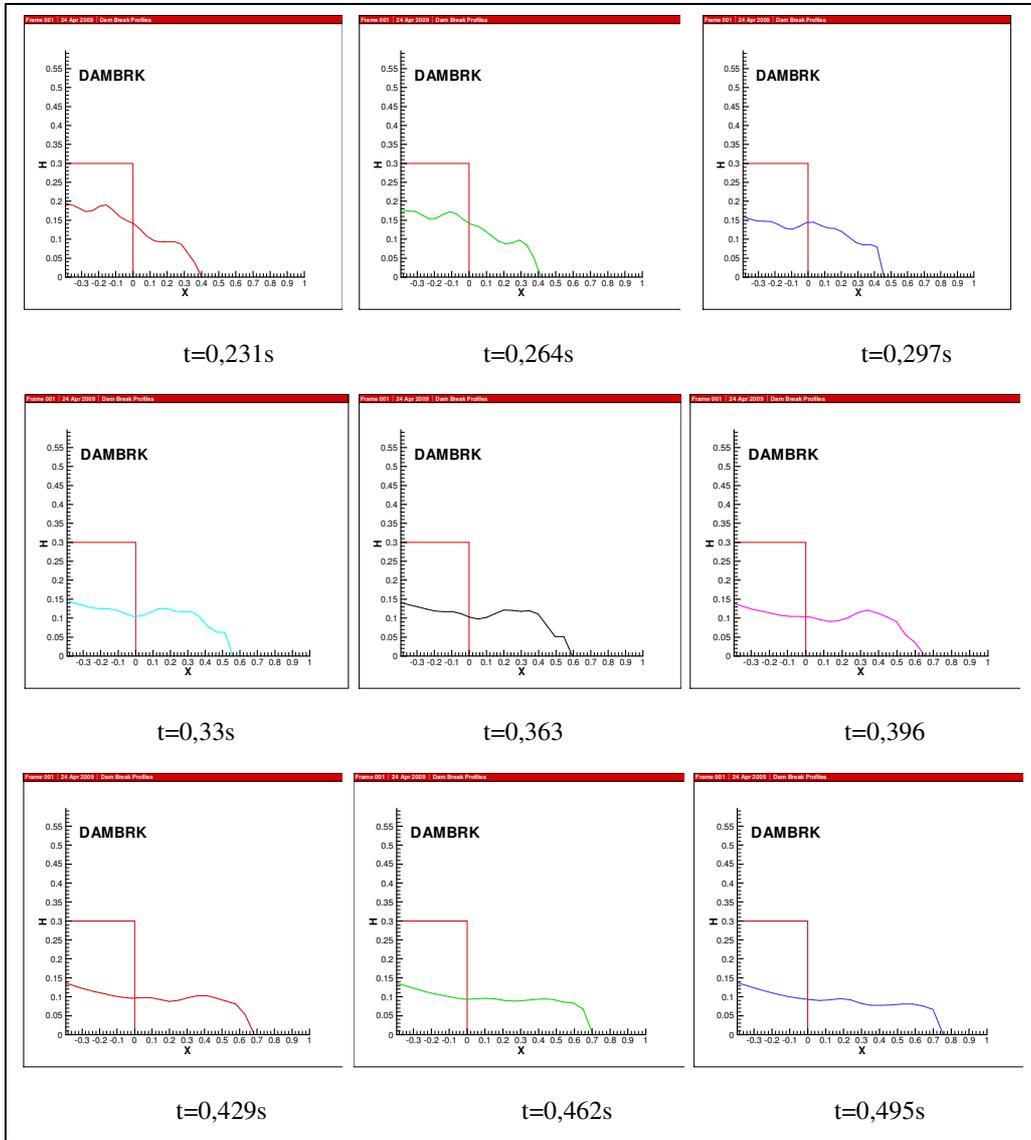
Figura 4.7 Imágenes fotográficas correspondientes al avance del fluido en el ensayo de la mezcla de 30% Cv con el modelo físico reducido.

Al estudiar en detalle el movimiento del fluido, una vez liberada la compuerta del reservorio, se observó la formación de una onda negativa que se movía hacia la parte posterior del reservorio, y una onda positiva que se movía hacia el canal. La marca dejada por el fluido en las paredes del reservorio muestra la forma en la cual se produjo el avance del frente de onda.

4.2 Resultados del modelo numérico Waraira Flor V 1.0

Los perfiles del flujo obtenidos al utilizar el modelo numérico Waraira Flow V 1.0 para la simulación de un deslave se muestran en las figuras 4.8 y 4.9





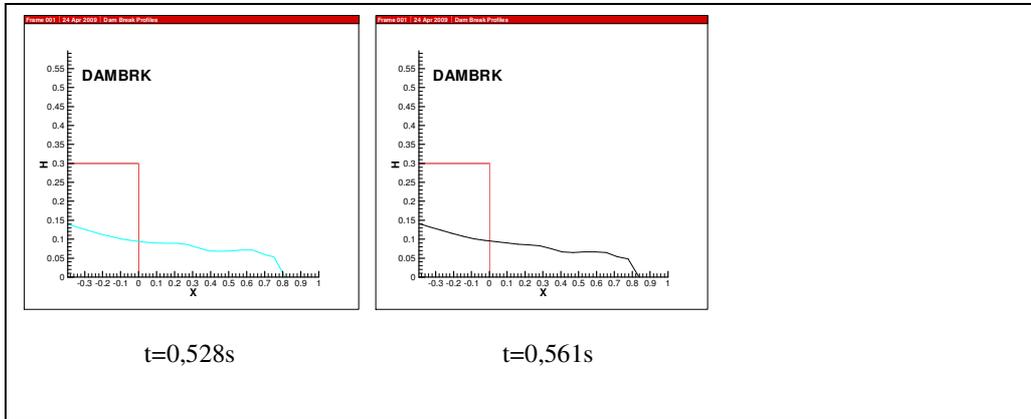
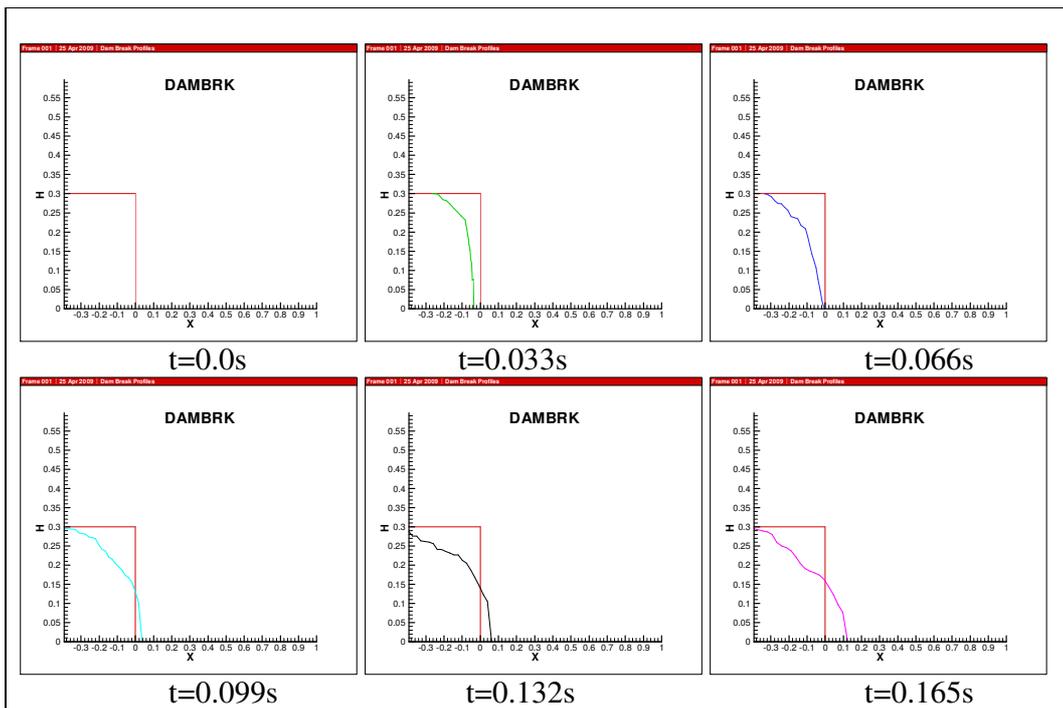


Figura 4.8 Perfiles de flujo obtenidos a partir de la simulación numérica de un deslave para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv



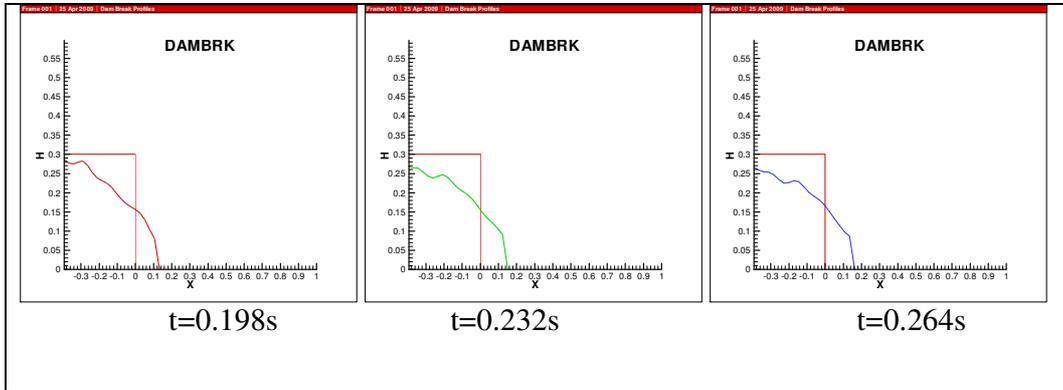
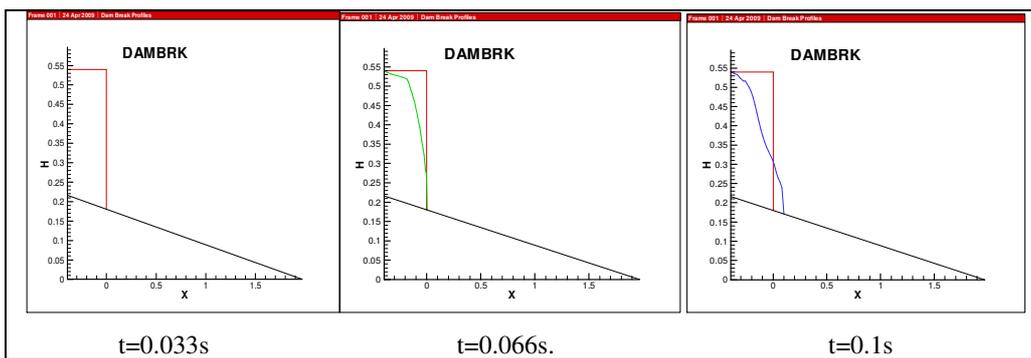
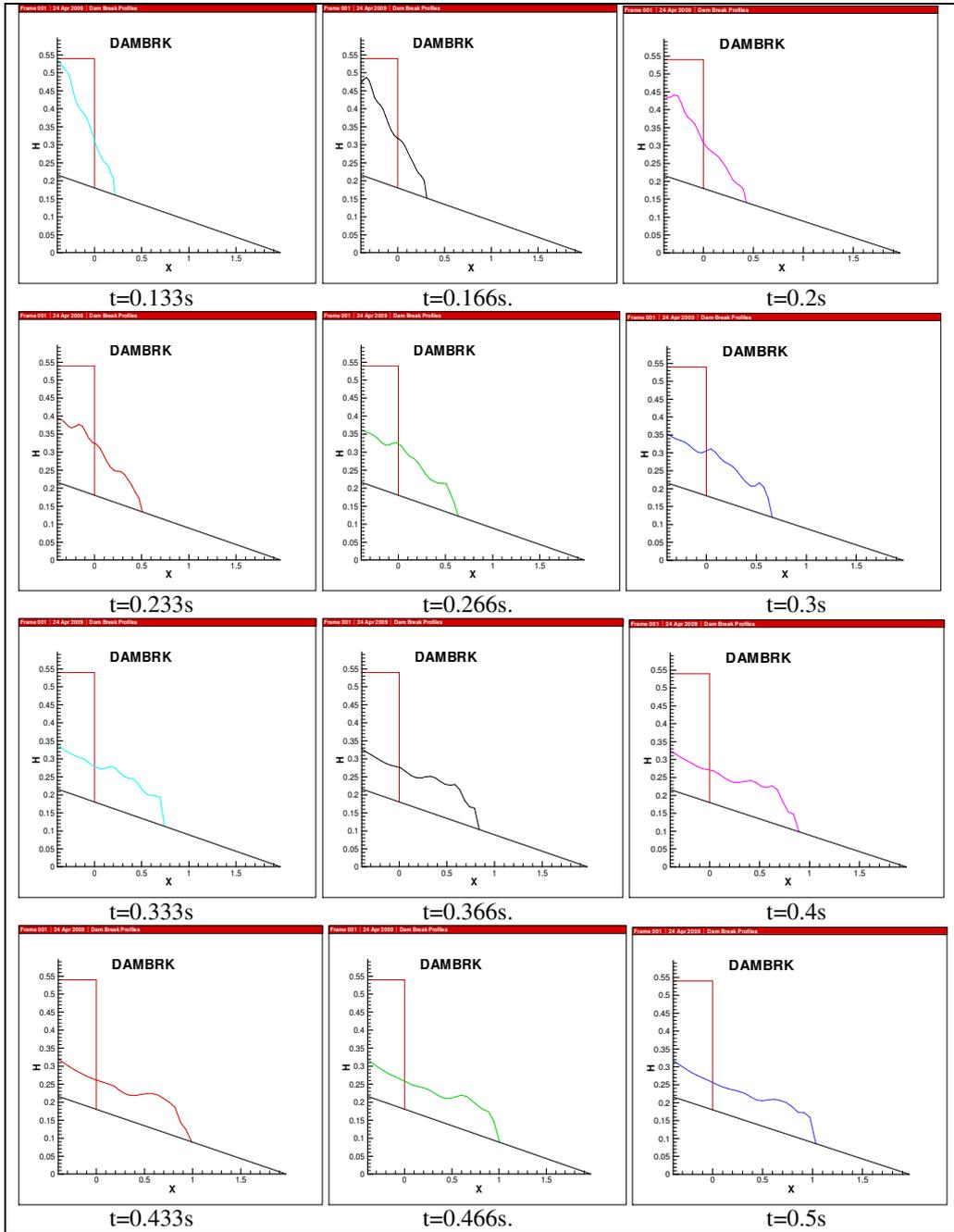


Figura 4.9 Perfiles de flujo obtenidos a partir de la simulación numérica de un deslave para una mezcla de agua y caolín al 30% C_v

En la siguiente secuencia de imágenes de la figura 4.10 se muestran los resultados de la solución numérica del modelo Waraira Flow V1.0 del rompimiento de compuerta para una mezcla hiperconcentrada del 25% en volumen, con una pendiente del 6%. La parte final del reservorio esta elevada 7 cm (0,23 pies) y la compuerta ubicada en el origen de coordenadas a una altura de 5,67 cm (0.18 pies)





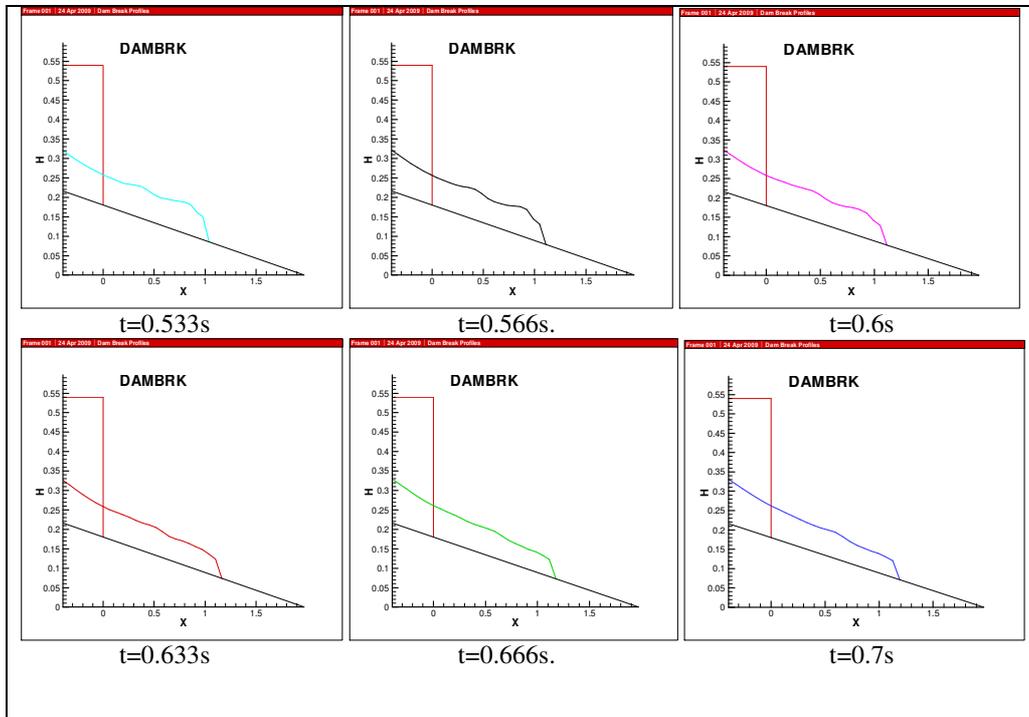


Figura 4.10 Perfiles de flujo obtenidos a partir de la simulación numérica de un deslave para una mezcla de agua y caolín al 25% C_v con una pendiente del 6%

Al comparar la distancia alcanzada por el frente de onda del fluido en diferentes instantes de tiempo, medidas a partir de los resultados obtenidos en el modelo físico reducido y las obtenidas a partir del modelo numérico Waraira Flow V1.0 se observó que la calibración del programa fue realizada en forma precisa, ya que los perfiles se asemejan entre sí. Los perfiles de la longitud recorrida por el frente de onda se muestran en las figuras 4.10 y 4.11.

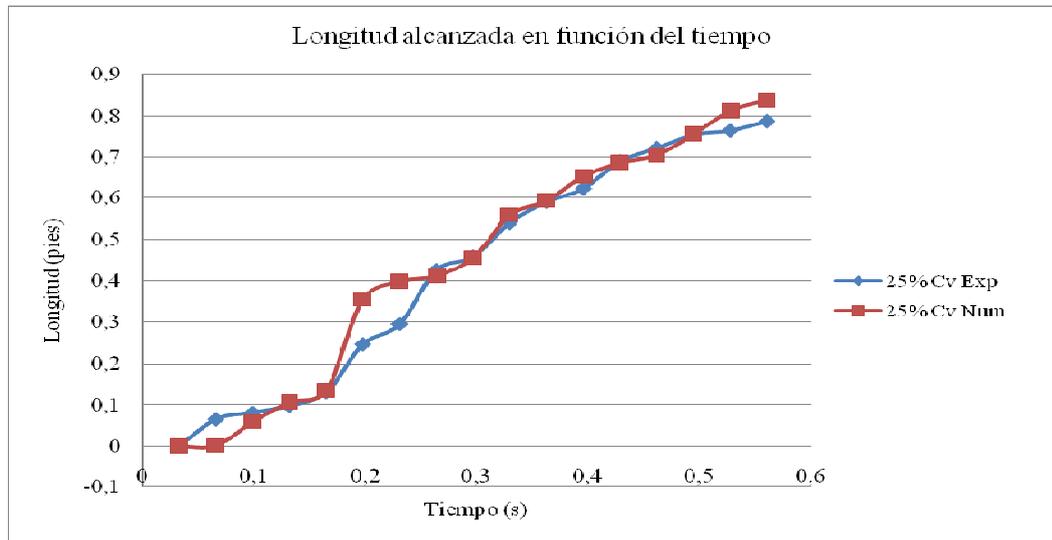


Figura 4.10 Comparación de la longitud alcanzada por el frente de onda en el ensayo con el modelo físico reducido y el modelo numérico de simulación Waraira Flow V 1.0 para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv

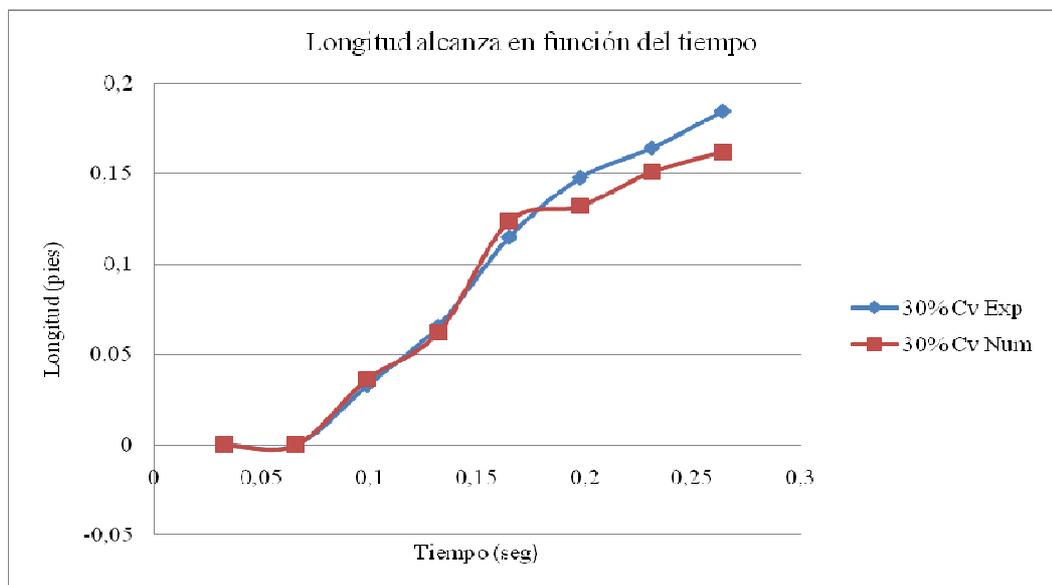


Figura 4.11 Comparación de la longitud alcanzada por el frente de onda en el ensayo con el modelo físico reducido y el modelo numérico de simulación Waraira Flow V 1.0 para una mezcla de agua y caolín al 30% Cv

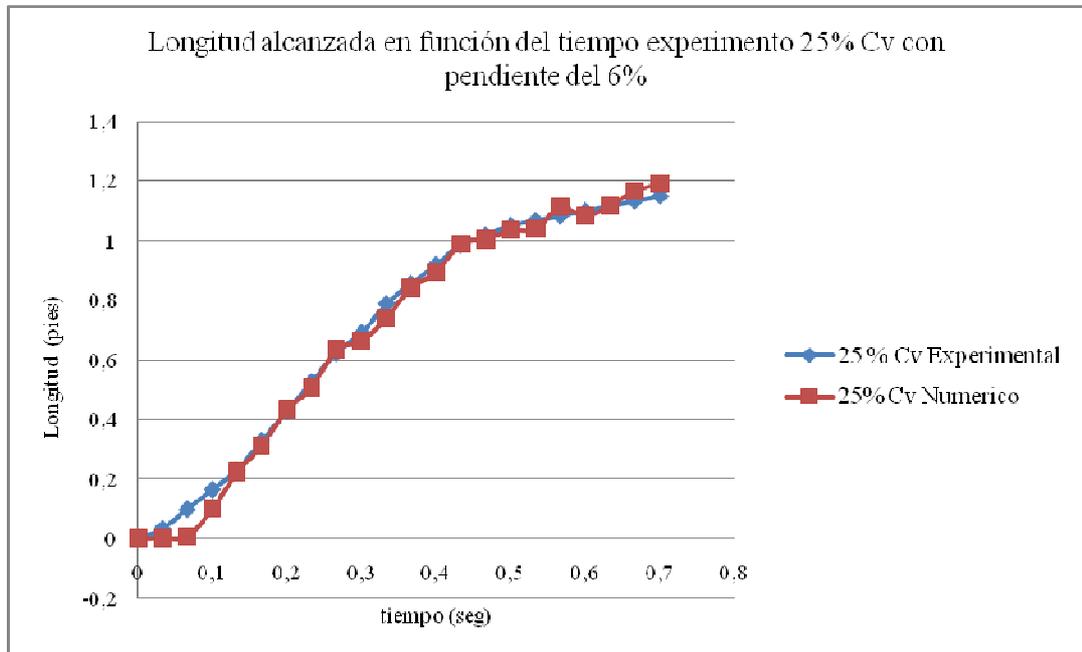


Figura 4.12 Comparación de la longitud alcanzada por el frente de onda en el ensayo con el modelo físico reducido y el modelo numérico de simulación Waraira Flow V 1.0 para una mezcla de agua y caolín al 25% Cv en un plano inclinado con una pendiente del 6%

4.3 Protocolo de ensayo

A partir de todas las experiencias realizadas, el siguiente protocolo fue realizado para garantizar la repetitibilidad de los resultados en futuros ensayos.

PROTOCOLO DE ENSAYO

El siguiente protocolo de ensayos está elaborado para realizar y ensayar mezclas de agua y caolín en un rango de concentraciones comprendido entre 25% y 35% en volumen.

a) Preparación de la mezcla

- Fije el volumen de la mezcla y la concentración requerida.
- Determine el volumen de caolín y agua necesarios.
- Determine la masa de agua y caolín necesarios.
- Tare la balanza a utilizar.
- Pese la cantidad de caolín que requiere la mezcla.
- Pese la cantidad de agua que requiere la mezcla.
- Coloque el agua en el recipiente que contendrá la mezcla.
- Agregue lentamente el caolín.
- Agite la mezcla a medida que se agregue caolín.
- Una vez agregado el caolín siga agitando la mezcla durante 5 minutos.
- Deje reposar la mezcla durante 10 minutos.
- La mezcla esta lista para ser utilizada.

b) Ensayo del penetrómetro

- Agite la mezcla a ensayar durante un minuto y deje reposar cinco minutos.
- Coloque la muestra en un beaker de 2000ml hasta alcanzar la marca de 1800 ml.
- Coloque el beaker de manera tal que su centro coincida con el eje del penetrómetro.
- Deje reposar la mezcla durante 10 minutos.
- Acerque el penetrómetro a la superficie de la mezcla

- Suelte el penetrómetro.
- Permita a el penetrómetro se hunda en la mezcla.
- Espere diez minutos hasta que el penetrómetro se estabilice
- Mida la distancia sumergida.
- A la distancia sumergida reste el valor del radio correspondiente a la punta del penetrómetro para obtener la distancia efectiva.
- Tome nota de la distancia efectiva sumergida.
- Extraiga el penetrómetro de la mezcla.
- Limpie el penetrómetro.
- Retire el beaker de la base del penetrómetro.
- Agite la mezcla durante un minuto y deje reposar otros diez minutos.
- Repetir el procedimiento.
- Para cada distancia efectiva calcule el esfuerzo de cedencia.
- Calcule un promedio de los esfuerzos de cedencia de la mezcla.

c) Ensayo de la prueba de Pashias

- Agite la mezcla a ensayar durante un minuto y deje reposar cinco minutos.
- Sujete firmemente el cilindro sobre la superficie y vierta la muestra en su interior hasta el ras del cilindro.
- Con una barra delgada agite la mezcla dentro del cilindro para extraer el aire.
- Asegúrese de que el volumen interno del cilindro este ocupado por la mezcla.

- Retire el exceso de mezcla y limpie el exterior del cilindro.
- Proceda a levantar lentamente el cilindro sobre la línea del eje del cilindro.
- Permita que la mezcla se expanda sobre la superficie.
- Mida la distancia horizontal que alcanza el fluido.
- Mida la altura alcanzada por el cilindro.
- Tome de las medidas realizadas.
- Retire la mezcla ensayada de la superficie y colóquela en el recipiente que contiene la totalidad de la mezcla.
- Limpie la superficie y el cilindro.
- Agite nuevamente la mezcla durante un minuto y deje reposar cinco minutos.
- Repita el ensayo.
- Calcule los valores de esfuerzo de cedencia.

c) Ensayo del reómetro de bola

- Agite la mezcla a ensayar durante un minuto y deje reposar cinco minutos.
- Coloque la muestra a ensayar en un beaker de 2000 ml hasta alcanzar 1800 ml.
- Pase el cordón a través de las poleas.
- Ate una masa de 0,2 lb. en un extremo del cordón.
- Ate una masa de 0,5 lb. en el otro extremo del cordón.

- Coloque la masa mayor en la parte superior del reómetro de manera que la masa de 0,2 lb. se encuentre en la posición mas baja.
- Coloque el beaker en el reómetro de manera que su centro coincida con centro del disco de acrílico.
- Deje caer la masa de 0,5 lb.
- En caso de que el sistema no se mueva, incremente la masa en cantidades de 0,5 lb. hasta que bajen.
- Una vez conseguida las masas que mueven el sistema déjelas caer.
- Mida el tiempo de caída de las masas.
- Cunte el número de vueltas que da la barra colocada excéntricamente en el disco acrílico.
- Tome nota de las masas, el tiempo y el número de vueltas.
- Retire el beaker del sistema.
- Limpie la barra excéntrica del disco.
- Agite la muestra durante un minuto y deje reposar cinco minutos.
- Repita el procedimiento.
- Calcule los esfuerzos de corte a partir de los datos tomados.
- Grafique los esfuerzos de corte calculados en función de la tasa de deformación del fluido en escala logarítmica.
- Obtenga el punto de corte con el eje de las coordenadas.
- El punto de corte corresponde con el esfuerzo de cedencia de la mezcla ensayada.

CAPITULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis de resultados experimentales

De las observaciones hechas a las mezclas de agua y caolín, la formación de una capa de agua sobre la mezcla se debe a que el caolín utilizado es una arcilla del tipo no expansiva. Esta arcilla absorbe una cierta cantidad de agua por capilaridad. En mezclas menos concentradas la cantidad de arcilla es menor por lo que la cantidad de agua absorbida es más pequeña que en las mezclas más concentradas. El agua absorbida por la arcilla se deposita entre las láminas que forman su estructura interna.

La formación de un camino después de realizar cada ensayo con el penetrómetro y con el reómetro de bola se debe a que las mezclas ensayadas presentan un factor de empaquetamiento elevado en comparación con otros fluidos como el agua, en la cual dicho factor aumenta con la concentración.

El factor de empaquetamiento hace que las partículas de arcilla mantengan una posición determinada dentro de la mezcla. Cuando el penetrómetro o la esfera del reómetro de bola deforman el fluido, las partículas se mantienen en la posición deformada un tiempo determinado que depende de la concentración de la mezcla. Un factor de empaquetamiento elevado, además, produce una mayor viscosidad de la mezcla. Es decir que hay una mayor resistencia a la deformación.

En los resultados obtenidos a partir de los ensayos con el penetrómetro, se observó que la distancia sumergida del penetrómetro en la mezcla se incrementaba a medida que aumentaba la masa del penetrómetro. Esto es debido a un incremento de la energía potencial del penetrómetro, el cual, una vez liberado, encuentra menos resistencia por parte de las fuerzas internas de la mezcla.

Otro resultado de este ensayo mostró un aumento del valor del esfuerzo de cedencia para una mezcla determinada al emplearse un penetrómetro de mayor masa. Este resultado se debe a que la ecuación utilizada para obtener los esfuerzos de cedencia de las mezclas ensayadas, es directamente proporcional a la masa del penetrómetro.

A los datos obtenidos con el ensayo del penetrómetro se les determinó la respectiva distribución estándar y la distribución probabilística de los datos experimentales mediante una distribución Normal. A través de esta distribución seleccionaron los rangos de datos más cercanos al promedio permitiendo delimitar el penetrómetro más eficaz para obtener el esfuerzo de cedencia para las diferentes mezclas ensayadas

De los resultados obtenidos al realizar la prueba de Pashias se observó una mayor expansión horizontal de las muestras a medida que la concentración de estas decrecía: Adicionalmente aumentó la diferencia entre la altura final del fluido y la altura inicial. Este resultado es producto del bajo factor de empaquetamiento que poseen las mezclas con concentraciones bajas, lo cual permite una deformación mayor y más fácil. Esto también explica el hecho de que los valores de esfuerzo de cedencia calculados con los datos obtenidos de la

prueba de Pashias sean mayores para las concentraciones más altas.

En el ensayo realizado con el reómetro de bola se observó un aumento del torque aplicado a la barra a medida que se aumentaban las masas que se ataban al extremo libre del cordón del reómetro, ya que a mayor masa se produce un aumento de la tensión en el cordón y dicha tensión es la que produce el torque que hace girar la barra del reómetro. Los esfuerzos de cedencia calculados para este ensayo aumentaban con la concentración de la mezcla ya que las fuerzas resistivas del fluido aumentan con la concentración, esto producto de un factor de empaquetamiento más alto.

En lo que se refiere al viscosímetro rotativo, su rango de operaciones sólo permitió estudiar una muestra, la correspondiente a una concentración de 25% Cv. Para las mezclas con concentraciones mayores el dial del viscosímetro no mostraba lecturas, debido a que el instrumento utilizado es para el estudio de fluidos de perforación cuyas viscosidades son mucho menores, en contraste con las de la mezclas de 30% Cv, 33% Cv y 35% Cv.

Los resultados obtenidos con el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300 se utilizaron para validar los resultados obtenidos a través de los ensayos empíricos del penetrómetro y del reómetro de bola.

Al comparar todos los resultados reológicos obtenidos en forma experimental, se pudo observar similitud entre los valores de esfuerzo de cedencia calculados a partir de los datos medidos con el penetrómetro, con la prueba de Pashias, con el viscosímetro rotativo y el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300, lo cual garantiza que dichos valores sí corresponden

con los esfuerzos de cedencia reales del fluido. Adicionalmente, los valores de esfuerzo de cedencia calculados fueron comparados con los valores obtenidos por Coussot (1997) que se encuentran reflejados en el texto “Mudflow Rheology and Dynamics”, observándose similitud entre los valores comparados.

La semejanza observada entre los valores de esfuerzo calculados a partir de los métodos empíricos y los medidos con el viscosímetro rotativo y el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300 permiten asegurar que los modelos empíricos se pueden utilizar como instrumentos de medición alternativos ya que los resultados que se obtienen a partir de estos presentan errores inferiores al 2%.

Por otro lado los esfuerzos de cedencia calculados a partir de las mediciones hechas con el reómetro de bola se alejan de los valores promedios obtenidos en las otras pruebas, debido a que este instrumento presenta muchas partes móviles, y por lo tanto se requiere mayor cantidad de masas que generen una fuerza mayor que permita vencer el roce de todas las partes móviles, así como la inercia de las barras y el disco.

Debido a la presencia de fuerzas adicionales que se requieren para mover el disco del reómetro los valores de esfuerzo calculados presentan errores superiores al 70 %. Por otra parte y de acuerdo con estudios realizados por Schatzmann, M; Véosla, G; y Minor, H. (2003), con reómetros de bola eléctricos de mayor precisión y exactitud que el reómetro de bola utilizado en este estudio, indican que estos instrumentos arrojan resultados confiables cuando se estudian fluidos Newtonianos, mientras que los resultados obtenidos

con fluidos no Newtonianos divergían para un rango de tasa de deformaciones entre 30 (1/s) y 100 (1/s).

En general, de los datos reológico calculados y medidos en forma experimental por diferentes métodos, los esfuerzos de cedencia obtenidos aumentan a medida que aumenta la concentración, esto es debido a la viscosidad de la mezcla, ya que las mismas se hacen menos viscosas a medida que hay menos caolín, es decir mientras disminuye la concentración, reduciendo la capacidad del fluido a resistir la deformación.

De los ensayos realizados con las muestras de 25% Cv y 30 % Cv en el modelo físico reducido se observa que la menos concentrada alcanzo una distancia horizontal mayor que la mezcla más concentrada, producto de la menor viscosidad que esta tiene, lo cual hace que ofrezca una resistencia menor a la fuerza de gravedad que actúa sobre el flujo una vez liberada la compuerta.

El tiempo en que ocurrió el flujo en ambas concentraciones fue menor a un segundo, producto de la alta energía potencial que se acumula en el fluido una vez que este se encuentra en el reservorio del canal y que una vez liberada la toda la energía potencial se transforma para dar movimiento al fluido que está dominado por las fuerzas inerciales.

En el momento que se realiza la liberación del fluido, como consecuencia del levantamiento de la compuerta se forman dos ondas; una de ellas negativa, que se mueve a una cierta velocidad en la parte superior del flujo, y la otra una onda positiva, que se origina en la parte inferior. Estas ondas se producen debido al propio peso del fluido el cual empuja fuera del reservorio

lo que se encuentra en la parte inferior cuando la compuerta se va levantando, además el mismo movimiento ascendente de la compuerta empuja parte del fluido hacia la parte posterior del reservorio.

Debido a la adherencia del fluido a las paredes del canal se pudo observar la forma en el cual se produjo el avance del frente de onda, y a partir de allí se pudo determinar cuánto fue el avance para intervalos de tiempo determinados. Durante este ensayo se consideró que el fluido se adhirió perfectamente a las paredes del canal de manera de poder considerar despreciable la tensión superficial del fluido.

5.2 Análisis de resultados del modelo numérico

La calibración del modelo numérico Waraira Flow V1.0 fue realizada con base a las mediciones del avance del frente de onda del fluido en el modelo físico reducido, los esfuerzos de cedencia calculados de manera experimental y las mediciones de viscosidad realizadas con el reómetro marca Anton Paar, modelo MCR 300. Debido a la condición tixotrópica del fluido fue necesario variar la viscosidad en los diferentes intervalos de tiempo que fueron introducidos en el modelo numérico, para garantizar así que los perfiles obtenidos fueran semejantes a los medidos en el modelo experimental.

Las viscosidades utilizadas corresponden a tasas de deformación bajas en los primeros instantes de tiempo y a tasas de deformación más elevada durante los últimos momentos del flujo.

Al realizar las comparaciones entre los perfiles de avance de frente de onda obtenidos a partir del modelo numérico y del modelo experimental se observa que los flujos con concentraciones más bajas los perfiles se ajustan mejor. Esto se debe a que el tiempo en el cual ocurre el flujo del fluido menos concentrado es mayor. Esto le permite al modelo numérico realizar un mayor número de iteraciones arrojando resultados más precisos. Adicionalmente se tiene que el flujo menos concentrado posee una viscosidad menor, lo cual reduce la fricción que se genere durante el flujo.

En el ensayo realizado con el modelo numérico Waraira Flow V1.0 para el rompimiento de compuerta con una pendiente del 6%; se observa que la distancia alcanzada así como la velocidad del frente de onda son mayores debido a la interacción de la pendiente en la dinámica del flujo. Además el reservorio se encuentra una mayor altura haciendo que el fluido almacene más energía potencial que se utiliza luego del rompimiento de la compuerta para mover el fluido por el canal.

Los perfiles obtenidos a partir del modelo numérico permiten predecir el alcance de un deslave de un flujo de fluido igual al utilizado en este estudio, en canales de mayor tamaño y mayor volumen de fluido. Asimismo y debido a que los flujos detríticos que se forman en la naturaleza poseen una energía potencial, una capacidad de arrastre de material, un avance y un poder destructivo mucho mayor que las mezclas analizadas en este estudio, se puede, basados a los resultados que arroja el modelo numérico, tener una perspectiva del alcance que tendría un deslave en una zona particular y elaborar medidas que prevengan las pérdidas humanas y materiales en dichas zonas.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se presentaron tres métodos no convencionales para determinar el esfuerzo de cedencia de lavas torrenciales (Fluido viscoplásticos). Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a un rango dado de concentraciones muestran una concordancia aceptable con los obtenidos con los reómetros convencionales: Las discrepancias entre los esfuerzos de fluencia obtenidos mediante los ensayos del penetrómetro y Pashias son del 10% con respecto a los reómetros convencionales. No obstante, el reómetro de bola mostró discrepancias muchos mayores.
- El fuerza de cedencia y la viscosidad son directamente proporcionales a la concentración de las mezclas.
- El modelo numérico de simulación utilizado fue el modelo unidimensional para flujo no permanente de lodo por el método de elemento finito Petrov-Galerkin el cual se encuentra actualmente en desarrollo. Fue calibrado a través de la determinación e una ley de fricción de tipo Herschel-Bulkley reducido a Bingham donde es $n=1$ y $K=\mu_B$ cuyos parámetros fueron obtenidos a partir de la reometría experimental.

- La selección de la escala del modelo físico reducido no resultó fácil de determinar. Muchos problemas aparecen en la selección de una escala determinada. A partir, de unos casos en donde se está dispuesto hacer suposiciones extremas sobre la apropiada ecuación constitutiva, una no-trivial teoría de dimensionamiento no puede ser construida para fluidos no newtonianos [Astarita 1979]

La escala se seleccionó a partir de la maniobrabilidad del equipo en el laboratorio con un modelo para fluidos viscoplásticos de Bingham para la búsqueda de simplicidad.

- Las soluciones numéricas con el modelo ya calibrado se compararon con los resultados experimentales del modelo físico reducido (canal) observándose resultados similares con ciertas discrepancias debido a que el modelo numérico mantiene viscosidades constantes

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES

Después de analizar y presentar las conclusiones de los resultados, es indispensable apuntar algunas recomendaciones finales:

- Conservar en recipientes herméticos las mezclas de agua y caolín.
- Verificar la densidad y viscosidad de la muestra antes de realizar cada ensayo.
- Si la temperatura ambiente es muy elevada, los ensayos no deben tardar más de veinte minutos, de manera de garantizar que no se evapore el agua contenida en la mezcla.
- Grabar con cámaras de video de alta velocidad todos los ensayos de rompimiento de compuerta.
- Preparar una cantidad de mezcla mayor a la requerida por el ensayo para compensar la que se pierde al cambiarla de recipiente.
- Realizar la prueba del penetrómetro con instrumentos de mayor diámetro y longitud.
- Realizar la prueba de Pashias con cilindros de diferentes diámetros y alturas.

- Realizar los ensayos del modelo físico reducido en un canal de mayores dimensiones y diferentes ángulos de inclinación de forma tal de obtener mayor precisión.
- Al realizar el ensayo en el modelo físico reducido, dejar reposar la mezcla una vez liberada durante al menos un día para verificar su avance horizontal.
- Realizar ensayos utilizando otro tipo de fluidos no newtonianos, como el caso de geles.
- Se recomienda la utilización de los modelos presentados, en problemas reales de utilidad social, como por ejemplo, la aplicación del modelo numérico unidimensional, en alguna de las cuencas del Parque Nacional Waraira Repano para de esta forma se trate de predecir y determinar de manera preventiva el alcance del frente de onda de las lavas torrenciales después de ocurrir el fenómeno del rompimiento de compuerta en aquellos sectores particularmente susceptibles a ser impactados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Aguirre, J., Moncada, A. y Olivero M. (2000). Solutions to debris flows. Universidad de los Andes. Venezuela. Mérida Facultad de Ingeniería Centro de Investigación de Hidráulica y Mecánica de Fluidos Laboratorio de Hidraulica.
- [2] Armanini, A., Fraccarollo, L. y Larcher, M. (2003). *Dynamics an energy balances in uniform liquid granular flows.*
- [3] Bateman, A., Medina, M., Steiner, F. y Velasco, D. (2006). *Estudio experimental sobre flujos granulars hiperconcentrados.* Universidad Politécnica de Cataluña. España
- [4] Bateman, A; Medina, M; Hürlimann, F y Velasco, D (2007) *Modelo Bidimensional para simulación de flujos detríticos: FLATModel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán* Universidad Politécnica de Cataluña. España
- [5] Bello, M., O'Brien, J., López, J. y García, R. *Simulation of flooding and debris flows in the Cerro Grande River.* Universidad Central de Venezuela. Caracas Facultad de Ingeniería Instituto de Mecánica de Fluidos
- [6] Berrios, R. y Wang, Y. (2002). *On the rheological behavior of Venezuela 1999 Atlantic Coast Mountains debris flows deposits.* Institute of Mountain Hazard and Environment. China
- [7] Castillo L. (2006) *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* Universidad Nacional de Ingeniería Perú. Facultad de Ingeniería Civil.

- [8] Coussot Philippe. *Mudflow Rheology and Dynamics*. IAHR-AIRH Monograph Series. 1997
- [9] Coussot, P: (1992). *Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées. Thèse*. Laboratoire de Rhéologie. CEMAGREF. Grenoble.
- [10] Crosta, G., Calvetti, F., Imposimato, S., Roddeman, D., Frattini, P. y Agliardi, F. (2001). *Granular flows and numerical modeling of landslides*. Universita Degli studi di Milano. Italia.
- [11] De Blasio, F., Elverhoi, A., Issler, D; Harbitz, C; Bryn, P y Lien ; R. (2004) *Flows models of natural debris flows originating from overconsolidated clay materials*. Universidad de Oslo e Instituto Geotécnico Noruego. Noruega
- [12] Ghilardi P., Savi F., Pilar M., Pílar G (2000). *Mathematical modelling of debris flows with a finite volume schem*. Dip. Di Ingegneria Idraulica e Ambientale, Universita di Pavía
- [13] Giles, R.(1994) *Mecánica de los fluidos e Hidráulica*. México. McGraw-Hill.
- [14] Iverson, R. (1997).*The physics of debris flow*. *United States Geological Survey Vancouver* .Estados Unidos
- [15] Iverson, R.y Denlinger, R. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across 3-D terrain. 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geomorphological Research*, B.
- [16] Lancarter, S., Hayes, S., y Grant G. (2002) *The effect of wood on Debris Flows*. Department of Geosciences, Oregon State University. Estados Unidos.

- [17] Matson, G y Hogg, A. (2006). Two-dimensional dam break flows of Herschel-Bulkley fluids: The approach to the arrested state. Centre for Environmental y Geophysical Flows. University of Bristol. Reino Unido
- [18] O'Brien J.S. y Julien, P. (1988). *Laboratory analysis of mudflow properties*. Journal of Hydraulic Engineering Vol. 114, No. 8, 877-887
- [19] O'Brien J.S. y Julien, P. y Fullerton, W. (1993). *Two-dimensional water flood and mudflow simulation*. Journal of Geology Vol. 119, No. 2, 244-261
- [20] Savage, S. y Hutter, K. (1991). *The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to run out. Part. I: Analysis*. Acta Mechanica, 86:201-223
- [21] Schatzmann M. (2005) *Rheometry for large particles and debris flows* Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
- [22] Seminario sobre flujos densos en áreas de montaña y jornada de estudio sobre riesgos hidrogeológicos en el noroeste argentino.
- [23] Shankar, R. *Non Newtonian Flows*. (2003). University of Bristol. Reino Unido.
- [24] Tarbuck, E. y Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra Una introducción a la geología física*. 8ta ed. España. Pearson Prentice Hall
- [25] Toshio, S. (2004) *Estudo Teórico-Experimental para a Determinação da Velocidade de Frentes de Lama Escoando em Canais*. Faculdade de engenharia de ilha solteira departamento de engenharia civil. Universidade Estadual Paulista
- [26] Uhlherr, J., Guo, J., Fang, T. y Tiu, C. (2001). *Static measurement of yield stress using a cylindrical penetrometer*. Department of chemical engineering. University of Science and technology. China

- [27] Aguirre, J., Moncada, A T, Guatarasma, L., Suárez, A. (2004). Reología y mecánica de barro y lodos. Universidad de los Andes. Venezuela Mérida Facultad de Ingeniería Centro de Investigación de Hidráulica y Mecánica de Fluidos (CHIDRA) Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 9, N.º 2, pp. 39-50, 2005
- [28] Astarita., G. (1979) Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Vol 4, No 2, 285-298.

APÉNDICES

*Apéndice I: Ecuaciones del movimiento análisis numérico unidimensional:
(Conservación de la masa y conservación del momentum)*

Para el flujo discontinuo en un canal es preferible expresar las ecuaciones (12) y (13) en la siguiente forma, con el caudal, Q , y el área, A , como variables primarias dependientes.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (C^2 - V^2) \frac{\partial A}{\partial x} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} = g A (S_o - S_f) + C^2 A_x^y \quad (\text{A.2})$$

donde la celeridad de la onda, C , se define como:

$$C = \left[\frac{g A}{B} \right]^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

Las ecuaciones (A.1) y (A.2) pueden compactarse y escribirse en forma matricial como:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{B} \quad (\text{A.4})$$

donde:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ C^2 - V^2 & 2V \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ g A(S_o - S_f) + C^2 A_x^y \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Apéndice II: Solución numérica del modelo unidimensional: Método del Elemento Finito Petrov-Galerkin

La formulación desarrollada se fundamenta en el trabajo de Katopodes (1984) quien aplicó el método de los elementos finitos Petrov-Galerkin a las ecuaciones del movimiento escritas para las condiciones de pendiente y fricción nulas, en un canal prismático rectangular. En el presente trabajo, el método se extiende para incluir una geometría arbitraria del canal, fricción, y pendiente.

El esquema numérico desarrollado describe el movimiento de la onda para el problema de rompimiento de una presa en el plano x-t. El contorno más a la derecha marca la posición del frente de la onda a profundidad cero y por lo tanto a caudal cero. El contorno más a la izquierda marca la posición negativa de la onda la cual se propaga hacia atrás, en el embalse. Sobre la línea de tiempo “ t_k ” la solución es conocida a partir de un cálculo anterior en “n” nodos computacionales.

La solución avanza a la línea de tiempo “ t_{k+1} ” localizando primero los nodos identificados con 1 y n. Luego se utiliza una extrapolación simple como sigue:

$$x_1^{k+1} = x_1^k + (V_1^k - C_1^k) \delta t_{k+1} \quad (\text{A.8})$$

$$x_n^{k+1} = x_n^k + V_{n-1}^k \delta t_{k+1} \quad (\text{A.9})$$

en la cual

$$\delta t_{k+1} = t_{k+1} - t_k \quad (\text{A.10})$$

Los subíndices en las ecuaciones (A.8) y (A.9) se refieren a la localización en x y los superíndices se refieren a la localización en el tiempo. En la ecuación (A.9), la suposición de Whitham (Sakkas and Strelkoff, 1973) ha sido utilizada para aproximar la velocidad del frente, esto es, $V_n = V_{n-1}$. Con x_1 y x_n determinadas, la línea de tiempo $k+1$ se divide en n nodos ($n-1$ elementos). Como se observa, el cálculo se realiza sobre la malla movible la cual sigue los contornos del dominio del flujo. En general, la localización x de cualquier punto nodal se inclina en el tiempo, y por lo tanto, las derivadas en el tiempo se modifican para tomar en cuenta el movimiento de la malla. Matemáticamente:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial \tau} - w \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{A.11})$$

en la cual $w = \partial x / \partial \tau$ y $\tau = t$. La variable w representa las velocidades nodales y es aproximada en la solución numérica por una simple diferencia.

La variación espacial de A y Q están representadas por funciones de base lineal sobre cada elemento. Estas funciones se definen como:

$$N_1 = \begin{cases} \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0 & x > x_2 \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

$$N_j = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} & x_{j-1} \leq x \leq x_j \\ \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j} & x_j \leq x \leq x_{j+1} \\ 0 & x < x_{j-1}, x > x_{j+1} \end{array} \right\} \quad 2 \leq j \leq n-1 \quad (\text{A.13})$$

$$N_n = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{x - x_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} & x_{n-1} \leq x \leq x_n \\ 0 & x < x_{n-1} \end{array} \right\} \quad (\text{A.14})$$

Las funciones definidas por las ecuaciones (A.12, A.13, A.14) muestran la variación espacial global. Generalmente, las funciones de base se definen en coordenadas locales sobre cada elemento. Esta representación muestra la variación espacial local. Donde N_1 y N_2 se definen como sigue:

$$N_1 = \frac{1}{2}(1 - \xi) \quad (\text{A.15})$$

$$N_2 = \frac{1}{2}(1 + \xi) \quad (\text{A.16})$$

Utilizando las ecuaciones (A.15) y (A.16), la aproximación para A y Q sobre cada elemento están localmente definidas por:

$$A = A_1 N_1 + A_2 N_2 \quad (\text{A.17})$$

$$Q = Q_1 N_1 + Q_2 N_2 \quad (\text{A.18})$$

en la cual los subíndices 1 y 2 se refieren, respectivamente, al nodo izquierdo y derecho del elemento local. En notación matricial, la aproximación numérica de la solución sobre un elemento puede representarse como sigue:

$$\mathbf{U} = \mathbf{N} \mathbf{u} \quad (\text{A.19})$$

en la cual:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & N_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.21})$$

Sustituyendo la ecuación (A.11) en la ecuación (A.4) con \mathbf{U} definido por la ecuación (A.19) produce el siguiente residuo, \mathbf{R} , que no puede ser cero, en virtud de la aproximación. Matemáticamente:

$$\mathbf{R} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} - w \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} - \mathbf{B} \quad (\text{A.22})$$

El método clásico de Galerkin se formula por el requerimiento de un error o residuo, \mathbf{R} , ortogonal a la función de ensayo, la cual es igual a la función de base. Este error se minimiza sobre el dominio entero del flujo, esto es, sobre todos los elementos. Matemáticamente:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \int_{L_i} \mathbf{N}^T \mathbf{R} \, dx = 0 \quad (\text{A.23})$$

en el cual $L_i = x_{i+1} - x_i$ = longitud de cada elemento. Katopodes (1984) demostró que el carácter no disipativo de la formulación de Galerkin conduce a oscilaciones erróneas en la cercanía de un resalto hidráulico, y por lo tanto, el método de Galerkin resulta inapropiado para el cálculo de flujo discontinuo.

En la formulación Petrov-Galerkin, el residuo se hace ortogonal a la función de ensayo la cual depende de la función base y de su derivada espacial. Después de Dendy (1974), Katopodes (1984) desarrolló la siguiente función de ensayo para el flujo en un canal abierto:

$$\mathbf{M} = \mathbf{N} + \varepsilon \mathbf{A}^T \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \quad (\text{A.24})$$

en la cual ε = parámetro de disipación. El parámetro de disipación es dado por (Katopodes, 1984)

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{|V + C|\sqrt{15}} \quad (\text{A.25})$$

en el cual $\Delta x =$ tamaño del elemento. Como es destacado por Katopodes (1984), utilizando $\varepsilon = \delta t/2$ lleva a un esquema similar al método de diferencias finitas Lax-Wendroff (Richtmyer and Morton, 1967, p. 300). Por lo tanto, se requiere de alguna experimentación numérica para determinar un valor óptimo de ε . En el presente estudio una variación para la ecuación (A.25) se adopta como sigue:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{(|V| + C)\sqrt{15}} \quad (\text{A.26})$$

Esta expresión permanece finita para el caso especial de flujo reverso a profundidad crítica cuando $V+C=0$. El Petrov-Galerkin equivalente de la ecuación (A.23) es por lo tanto:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \int_{L_i} \mathbf{M}^T \mathbf{R} dx = 0 \quad (\text{A.27})$$

Las derivadas en el tiempo en la ecuación (A.27) se sustituyen por una diferencia central de la forma:

$$\frac{\mathbf{U}^{k-1} - \mathbf{U}^k}{\delta t_{k+1}} = \theta \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right]^{k+1} + (1 - \theta) \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right]^k \quad (\text{A.28})$$

en la cual θ = factor de ponderación. Así, la derivada en el tiempo en el paso $k+1$ se aproxima de la manera siguiente:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right]^{k+1} = \frac{\mathbf{U}^{k+1} - \mathbf{U}^k}{\theta \delta t_{k+1}} - \left[\frac{1-\theta}{\theta} \right] \left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right]^k \quad (\text{A.29})$$

donde:

$$\left[\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right]^k = \frac{\mathbf{U}^k - \mathbf{U}^{k-1}}{\delta t_k} \quad (\text{A.30})$$

En el nodo j , la velocidad nodal en la ecuación (A.22) se aproxima como sigue:

$$w_j = \frac{x_j^{k+1} - x_j^k}{\delta t_{k+1}} \quad (\text{A.31})$$

A nivel del elemento, la ecuación (A.27) se puede expresar en forma escalar.

Para un solo elemento:

$$\mathbf{a}_i = \int_L \left[\mathbf{N}_i \mathbf{F}_A + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{N}_i}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{F}_Q \right] dx \quad (\text{A.32})$$

$$\mathbf{q}_i = \int_L \left[\varepsilon (C^2 - V^2) \frac{\partial \mathbf{N}_i}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{F}_A + \left(\mathbf{N}_i + 2\varepsilon V \frac{\partial \mathbf{N}_i}{\partial \mathbf{x}} \right) \mathbf{F}_Q \right] dx \quad (\text{A.33})$$

donde L=tamaño del elemento y

$$\mathbf{F}_A = \alpha A - \beta_A - w \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (\text{A.34})$$

$$\mathbf{F}_Q = \alpha Q - \beta_Q - w \frac{\partial Q}{\partial x} + (C^2 - V^2) \frac{\partial A}{\partial x} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) - C^2 A_x^y \quad (\text{A.35})$$

En las ecuaciones (A.32) y (A.33), $i=1$ o $i=2$ para la función de ponderación en el nodo izquierdo y el nodo derecho, respectivamente, en el elemento. Los parámetros α , β_A , y β_Q se definen como:

$$\alpha = \frac{1}{\theta \delta t_{k+1}} \quad (\text{A.36})$$

$$\beta_A = \alpha A^k + \frac{1-\theta}{\theta} \left[\frac{A^k - A^{k-1}}{\delta t_k} \right] \quad (\text{A.37})$$

$$\beta_Q = \alpha Q^k + \frac{1-\theta}{\theta} \left[\frac{Q^k - Q^{k-1}}{\delta t_k} \right] \quad (\text{A.38})$$

En las ecuaciones (A.32)-(A.35) las variables son evaluadas sobre la línea de tiempo $k+1$.

La ecuación (A.27) conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas no lineal definido sobre cada elemento por las ecuaciones (A.32) y (A.33). Este sistema se resuelve utilizando el método de Newton. A nivel del elemento las ecuaciones se representan como sigue:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{a}_i}{\partial \mathbf{A}_j} & \frac{\partial \mathbf{a}_i}{\partial \mathbf{Q}_j} \\ \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial \mathbf{A}_j} & \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial \mathbf{Q}_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{A} \\ \delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_i \\ \mathbf{q}_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.39})$$

Las ecuaciones del elemento se suman apropiadamente para formar una matriz global Jacobiana (rigidez) y un vector global en el lado derecho. La solución de este sistema por un esquema de eliminación da la corrección $\delta \mathbf{A}$ y $\delta \mathbf{Q}$ al vector solución. Matemáticamente:

$$\mathbf{A}_j^{m+1} = \mathbf{A}_j^m + \delta \mathbf{A}_j^m \quad (\text{A.40})$$

$$\mathbf{Q}_j^{m+1} = \mathbf{Q}_j^m + \delta \mathbf{Q}_j^m \quad (\text{A.41})$$

donde j =número del nodo y m =contador de iteración. Generalmente 2 o 3 iteraciones se requieren en cada paso de tiempo hasta que $\delta \mathbf{A}$ y $\delta \mathbf{Q}$ sean lo suficientemente pequeños.

Apéndice III: Reómetro de plato rotativo

El reómetro está compuesto por dos cilindros coaxiales. La rotación relativa entre los discos deforma el material que se coloca entre los discos. Considerando la simetría del problema el esfuerzo de corte aparece dependiente solo del radio de los discos, de igual forma la tasa de corte es solo dependiente del radio de los discos y viene dada por la expresión.

$$\gamma = \gamma(r) = \frac{\Omega r}{h} \quad (\text{A.42})$$

El torque ejercido por el disco superior viene dado por

$$C = \int_0^R 2\pi r \tau(r) r dr = \frac{2\pi}{\left(\frac{\Omega}{3}\right)^3} \int_0^{(R\Omega/h)} \gamma^2 \tau(\gamma) d\gamma \quad (\text{A.43})$$

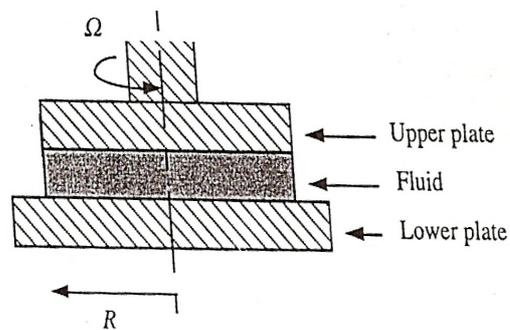


Figura A.III.1 Reómetro de planos paralelos

Diferenciando la ecuación (A.43) relativa a $\gamma(R) = \gamma\mathcal{R}$, se obtiene la expresión para el esfuerzo de corte en la periferia.

$$\tau(\gamma\mathcal{R}) = \frac{3C}{2\pi\mathcal{R}^3} + \frac{\gamma\mathcal{R}}{2\pi\mathcal{R}^3} \frac{dC}{d\gamma\mathcal{R}} \quad (\text{A.44})$$

Un conjunto de datos en pares $(\tau, \gamma\mathcal{R})$ pueden ser deducidos de otro grupo de pares de datos (C, Ω) . En la práctica para una suspensión de lodo (con n alrededor de 1/3), el segundo termino en lado derecho de la igualdad de la ecuación (A.44) es pequeño comparado con el primer termino de la misma ecuación

Apéndice IV: Tabla de datos

- Datos obtenidos por el reómetro Anton Paar

Tabla A.1 muestra de agua y caolín al 25%Cv

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Temperature
	[1/s]	[Pa]	[cP]	[°C]
1	0,01	52,4	5.240.000	25
2	0,0157	57,7	3.670.000	25
3	0,0247	59,5	2.410.000	25
4	0,0389	60,5	1.560.000	25
5	0,0611	60,8	995.000	25
6	0,0961	60,7	632.000	25
7	0,151	60,3	399.000	25
8	0,237	60,2	253.000	25
9	0,373	60,2	161.000	25
10	0,587	60,8	104.000	25
11	0,923	61,4	66.500	25
12	1,45	62	42.700	25
13	2,28	66,1	29.000	25
14	3,59	75,9	21.200	25
15	5,64	84,9	15.100	25
16	8,87	97,7	11.000	25
17	13,9	112	8.040	25
18	21,9	124	5.650	25
19	34,5	141	4.080	25
20	54,2	164	3.020	25
21	85,2	197	2.310	25
22	134	237	1.770	25
23	211	280	1.330	25
24	331	331	999	25
25	520	388	745	25
26	818	448	548	25
27	1.290	498	387	25
28	2.020	574	284	25
29	3.180	691	217	25
30	5.010	869	174	25

Tabla A.2 muestra de agua y caolín al 30%Cv

Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Temperature
	[1/s]	[Pa]	[cP]	[°C]
1	0,01	106	10.600.000	25
2	0,0157	106	6.710.000	25
3	0,0247	115	4.660.000	25
4	0,0389	138	3.550.000	25
5	0,0611	140	2.290.000	25
6	0,0961	143	1.490.000	25
7	0,151	145	958.000	25
8	0,237	148	625.000	25
9	0,373	150	401.000	25
10	0,587	152	259.000	25
11	0,923	155	168.000	25
12	1,45	160	110.000	25
13	2,28	169	74.200	25
14	3,59	180	50.300	25
15	5,64	197	34.900	25
16	8,87	219	24.700	25
17	13,9	252	18.000	25
18	21,9	299	13.600	25
19	34,5	362	10.500	25
20	54,2	450	8.300	25
21	85,2	541	6.350	25
22	134	658	4.920	25
23	211	833	3.950	25
24	331	1.070	3.230	25
25	520	1.360	2.620	25
26	818	1.630	1.990	25
27	1.290	1.900	1.470	25
28	2.020	2.080	1.030	25,1
29	3.180	331	104	25,1
30	5.000	81,7	16,3	25

Tabla A.3 muestra de agua y caolín al 33%Cv

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [°C]
1	0,01	112	11.100.000	25
2	0,0157	120	7.660.000	25
3	0,0247	140	5.650.000	25
4	0,0389	172	4.430.000	25
5	0,0611	175	2.870.000	25
6	0,0961	177	1.840.000	25
7	0,151	179	1.180.000	25
8	0,237	179	755.000	25
9	0,373	179	480.000	25
10	0,587	180	307.000	25
11	0,923	181	196.000	25
12	1,45	182	125.000	25
13	2,28	181	79.500	25
14	3,59	192	53.500	25
15	5,64	197	35.000	25
16	8,87	212	23.900	25
17	13,9	238	17.100	25
18	21,9	277	12.700	25
19	34,5	337	9.770	25
20	54,2	412	7.610	25
21	85,2	492	5.770	25
22	134	589	4.400	25
23	211	734	3.490	25
24	331	920	2.780	25
25	520	1.130	2.180	25
26	818	1.410	1.720	25
27	1.290	1.680	1.300	25
28	2.020	1.950	963	25
29	3.180	1.270	398	25,1
30	5.000	154	30,9	25,1

Apéndice V: Datos, resultados del modelo Numérico Waraira Flow V1.0 y del ensayo de Pashias

- *Dabla de datos*

```

T1 Prueba 1:
T2 simulación Experimental de Rompimiento de Presa en Canal
T3 Realizado por Nosotros
T4
T5 Esta prueba fue desarrollada para el uso de Waraira Flow VERSION 1.0
T6 Universidad Central de Venezuela
T7
AD 002      3      0
GR  0 0.1968 0.1968 -0.3936 0.00
GR  0 0.1968 0.1968  0.0 0.00
GR  0 0.1968 0.1968  1.96 0.00
NS 15  21  0.01  250  1.10  0.02  0.03  1.01  1 0.0001
FP 32.2 0.02 1.09857 88.9598
PC  5  40  1  0
DB 0.394 -0.3936 0.00 0.295
FE 0.0 0.2582 0.5 3000 11 11 1 0.0 0.0 0.5
FC  4  4
HL  0.2460 0.2953 0.4265 0.4593
PT  0.198 0.231 0.264 0.297
    
```

- *Resultados velocidad de frente de onda , área, descarga, localización en x y la elevación*

```

***** UNI-DIMENSIONAL PETROV GALERKIN *****
***** MODELO ELEMENTO FINITO *****
***** WARAIRA FLOW 1.0 MAR, 2009 *****
    
```

```

T1 Prueba 1:
T2 Simulación Experimental de Rompimiento de Presa en Canal
T3 Realizado por Nosotros
T4
T5 Esta prueba fue desarrollada para el uso de Waraira Flow VERSION 1.0
T6 Universidad Central de Venezuela (Hasta la Victoria Siempre)
T7
    
```

MODELO UNI-DIMENSIONAL PARA FLUJO DE DETRITOS SIMULACION.
INFORMACION DE ESTE PROGRAMA SE OBTUVO DE LA:
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA LOS CHAGURAMOS
DPT ENERGETICA,
TEL. (0414) 2540806

ENTRADA DE PARAMETROS ESPECIFICOS PARA LA CORRIDA:

DIMENSIONES

IRUN= 2 MI= 3 MH= 0

GEOMETRIA

I EE BL BR X0' Z0

1 0.0000E+00 0.1968E+00 0.1968E+00 -0.3936E+00 0.0000E+00
2 0.0000E+00 0.1968E+00 0.1968E+00 0.0000E+00 0.0000E+00
3 0.0000E+00 0.1968E+00 0.1968E+00 0.1960E+01 0.0000E+00

HYDROGRAMAS

I TH QH

PARAMETROS DE SOLUCION NUMERICA

NTN= 15
NP= 21
DT0= 0.100000E-01
MXT= 250
FRC= 0.110000E+01
DTM= 0.200000E-01
TII= 0.300000E-01
RDX= 0.101000E+01
IFRICT= 1
TOLER= 0.100000E-03

PROPIEDADES DEL FLUIDO

G= 0.322000E+02
VIS= 0.280000E+00
YST= 0.109857E+01
WT= 0.889598E+02

CONTROL

IF5= 5
IF6= 40
IF7= 1
IF9= 0

PARAMETROS DEL TANQUE

BRES= 0.394000E+00
XRES= -0.393600E+00
SRES= 0.000000E+00
YDAM= 0.295000E+00

PARAMETROS DE SOLUCION POR ELEMENTO FINITO

YADV= 0.0000000E+00
DIS= 0.2582000E+00
THETA= 0.5000000E+00
ISKMAX= 3000
NFI01= 11
NFI02= 11
NGWAVE= 1
TOE= 0.0000000E+00
DTTOE= 0.0000000E+00
YTP= 0.5000000E+00

ESPECIFICACION DE LOCALIZACION DE HYDROGRAMAS
NHYD= 4
XHYD= 0.656000E-01 0.820000E-01 0.984000E-01 0.131000E+00

ESPECIFICACION DE PERFILES DE TIEMPO
NPRO= 4
TPRO= 0.660000E-01 0.990000E-01 0.132000E+00 0.165000E+00

FIN DE LA ENTRADA RESUMEN.
COMIENZO DEL COMPUTO.

Y1= 0.500000E+00 V1=-0.1860871E+01 W(1)=-0.1860871E+01
X00=-0.9246134E-01 X1=-0.1762006E+00 X2=-0.1570134E-01

CTP= 0.1283994E+01 C1= 0.4012481E+01
III= 0 ITER= 0 TIME= 0.00 XTIP= -0.02 %VOLUME DIFFERENCE= -18.7

DETAILED PRINTOUT REQUESTED FOR TIME STEP 0

I X-LOCATION DISCHARGE AREA DEPTH VELOCITY ELEVATION FROUDE# FRIC.SLOPE TOP WIDTH

1	-0.9246E-01	0.0000E+00	0.1161E+00	0.2950E+00	0.0000E+00	0.2950E+00	0.0000E+00	0.1046E+00	0.3936E+00
2	-0.8862E-01	-0.2815E+00	0.1513E+00	0.3844E+00	-0.1861E+01	0.3844E+00	-0.5289E+00	-0.5966E+00	0.3936E+00
3	-0.8479E-01	-0.2765E+00	0.1486E+00	0.3775E+00	-0.1861E+01	0.3775E+00	-0.5337E+00	-0.6045E+00	0.3936E+00
4	-0.8095E-01	-0.2713E+00	0.1458E+00	0.3704E+00	-0.1861E+01	0.3704E+00	-0.5388E+00	-0.6132E+00	0.3936E+00
5	-0.7711E-01	-0.2659E+00	0.1429E+00	0.3630E+00	-0.1861E+01	0.3630E+00	-0.5443E+00	-0.6226E+00	0.3936E+00
6	-0.7327E-01	-0.2602E+00	0.1398E+00	0.3553E+00	-0.1861E+01	0.3553E+00	-0.5502E+00	-0.6329E+00	0.3936E+00
7	-0.6943E-01	-0.2543E+00	0.1367E+00	0.3472E+00	-0.1861E+01	0.3472E+00	-0.5566E+00	-0.6442E+00	0.3936E+00
8	-0.6560E-01	-0.2481E+00	0.1333E+00	0.3387E+00	-0.1861E+01	0.3387E+00	-0.5635E+00	-0.6568E+00	0.3936E+00
9	-0.6176E-01	-0.2416E+00	0.1298E+00	0.3298E+00	-0.1861E+01	0.3298E+00	-0.5710E+00	-0.6709E+00	0.3936E+00
10	-0.5792E-01	-0.2346E+00	0.1261E+00	0.3204E+00	-0.1861E+01	0.3204E+00	-0.5794E+00	-0.6869E+00	0.3936E+00
11	-0.5408E-01	-0.2273E+00	0.1222E+00	0.3103E+00	-0.1861E+01	0.3103E+00	-0.5887E+00	-0.7051E+00	0.3936E+00
12	-0.5024E-01	-0.2195E+00	0.1179E+00	0.2996E+00	-0.1861E+01	0.2996E+00	-0.5991E+00	-0.7263E+00	0.3936E+00
13	-0.4641E-01	-0.2110E+00	0.1134E+00	0.2881E+00	-0.1861E+01	0.2881E+00	-0.6110E+00	-0.7512E+00	0.3936E+00
14	-0.4257E-01	-0.2018E+00	0.1085E+00	0.2756E+00	-0.1861E+01	0.2756E+00	-0.6247E+00	-0.7812E+00	0.3936E+00
15	-0.3873E-01	-0.1917E+00	0.1030E+00	0.2618E+00	-0.1861E+01	0.2618E+00	-0.6410E+00	-0.8183E+00	0.3936E+00
16	-0.3489E-01	-0.1804E+00	0.9695E-01	0.2463E+00	-0.1861E+01	0.2463E+00	-0.6607E+00	-0.8659E+00	0.3936E+00
17	-0.3105E-01	-0.1675E+00	0.9000E-01	0.2287E+00	-0.1861E+01	0.2287E+00	-0.6858E+00	-0.9303E+00	0.3936E+00
18	-0.2722E-01	-0.1522E+00	0.8177E-01	0.2078E+00	-0.1861E+01	0.2078E+00	-0.7195E+00	-0.1025E+01	0.3936E+00
19	-0.2338E-01	-0.1329E+00	0.7144E-01	0.1815E+00	-0.1861E+01	0.1815E+00	-0.7698E+00	-0.1183E+01	0.3936E+00
20	-0.1954E-01	-0.1055E+00	0.5670E-01	0.1441E+00	-0.1861E+01	0.1441E+00	-0.8640E+00	-0.1545E+01	0.3936E+00
21	-0.1570E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	-0.1861E+01	0.0000E+00	0.1000E+11	0.1000E+11	0.3936E+00

NSZF(NO. OF EQS.)= 38
ISTO(REQUIRED STORAGE)= 220
III= 1 ITER=12 TIME= 0.04 XTIP= -0.03 %VOLUME DIFFERENCE= -26.1

DETAILED PRINTOUT REQUESTED FOR TIME STEP 1

I X-LOCATION DISCHARGE AREA DEPTH VELOCITY ELEVATION FROUDE# FRIC.SLOPE TOP WIDTH

1	-0.1233E+00	0.0000E+00	0.1161E+00	0.2950E+00	0.0000E+00	0.2950E+00	0.0000E+00	0.1046E+00	0.3936E+00
2	-0.1188E+00	-0.2691E+00	0.1743E+00	0.4428E+00	-0.1544E+01	0.4428E+00	-0.4090E+00	-0.4330E+00	0.3936E+00
3	-0.1144E+00	-0.2007E+00	0.1569E+00	0.3987E+00	-0.1279E+01	0.3987E+00	-0.3570E+00	-0.3701E+00	0.3936E+00
4	-0.1099E+00	-0.2150E+00	0.1562E+00	0.3970E+00	-0.1376E+01	0.3970E+00	-0.3848E+00	-0.4065E+00	0.3936E+00
5	-0.1055E+00	-0.2069E+00	0.1512E+00	0.3842E+00	-0.1368E+01	0.3842E+00	-0.3889E+00	-0.4135E+00	0.3936E+00
6	-0.1010E+00	-0.2036E+00	0.1474E+00	0.3744E+00	-0.1382E+01	0.3744E+00	-0.3979E+00	-0.4269E+00	0.3936E+00
7	-0.9659E-01	-0.1983E+00	0.1432E+00	0.3638E+00	-0.1385E+01	0.3638E+00	-0.4046E+00	-0.4378E+00	0.3936E+00
8	-0.9214E-01	-0.1925E+00	0.1390E+00	0.3533E+00	-0.1385E+01	0.3533E+00	-0.4106E+00	-0.4480E+00	0.3936E+00
9	-0.8769E-01	-0.1862E+00	0.1347E+00	0.3423E+00	-0.1382E+01	0.3423E+00	-0.4162E+00	-0.4582E+00	0.3936E+00
10	-0.8324E-01	-0.1789E+00	0.1304E+00	0.3314E+00	-0.1372E+01	0.3314E+00	-0.4200E+00	-0.4664E+00	0.3936E+00
11	-0.7880E-01	-0.1713E+00	0.1258E+00	0.3195E+00	-0.1362E+01	0.3195E+00	-0.4246E+00	-0.4766E+00	0.3936E+00
12	-0.7435E-01	-0.1623E+00	0.1212E+00	0.3079E+00	-0.1339E+01	0.3079E+00	-0.4254E+00	-0.4821E+00	0.3936E+00
13	-0.6990E-01	-0.1533E+00	0.1158E+00	0.2942E+00	-0.1324E+01	0.2942E+00	-0.4303E+00	-0.4948E+00	0.3936E+00
14	-0.6545E-01	-0.1419E+00	0.1109E+00	0.2817E+00	-0.1279E+01	0.2817E+00	-0.4248E+00	-0.4934E+00	0.3936E+00

15 -0.6100E-01 -0.1317E+00 0.1041E+00 0.2644E+00 -0.1265E+01 0.2644E+00 -0.4336E+00 -0.5162E+00 0.3936E+00
 16 -0.5655E-01 -0.1161E+00 0.9909E-01 0.2517E+00 -0.1172E+01 0.2517E+00 -0.4116E+00 -0.4929E+00 0.3936E+00
 17 -0.5210E-01 -0.1054E+00 0.8916E-01 0.2265E+00 -0.1182E+01 0.2265E+00 -0.4378E+00 -0.5538E+00 0.3936E+00
 18 -0.4766E-01 -0.8145E-01 0.8514E-01 0.2163E+00 -0.9566E+00 0.2163E+00 -0.3625E+00 -0.4473E+00 0.3936E+00
 19 -0.4321E-01 -0.7281E-01 0.6701E-01 0.1703E+00 -0.1086E+01 0.1703E+00 -0.4640E+00 -0.6855E+00 0.3936E+00
 20 -0.3876E-01 -0.2532E-01 0.6818E-01 0.1732E+00 -0.3713E+00 0.1732E+00 -0.1572E+00 -0.1413E+00 0.3936E+00
 21 -0.3431E-01 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 -0.3713E+00 0.0000E+00 0.1000E+11 0.1000E+11 0.3936E+00

III= 5 ITER= 4 TIME= 0.09 XTIP= 0.03 %VOLUME DIFFERENCE= -13.3

NSZF(NO. OF EQS.)= 39

ISTO(REQUIRED STORAGE)= 225

III= 10 ITER= 4 TIME= 0.18 XTIP= 0.14 %VOLUME DIFFERENCE= -8.9
 III= 15 ITER= 4 TIME= 0.28 XTIP= 0.20 %VOLUME DIFFERENCE= -8.0
 III= 20 ITER= 3 TIME= 0.38 XTIP= 0.24 %VOLUME DIFFERENCE= -7.2
 III= 25 ITER= 3 TIME= 0.48 XTIP= 0.28 %VOLUME DIFFERENCE= -6.4
 III= 30 ITER= 3 TIME= 0.58 XTIP= 0.31 %VOLUME DIFFERENCE= -5.7
 III= 35 ITER= 3 TIME= 0.68 XTIP= 0.33 %VOLUME DIFFERENCE= -5.0
 III= 40 ITER= 3 TIME= 0.78 XTIP= 0.36 %VOLUME DIFFERENCE= -4.3

DETAILED PRINTOUT REQUESTED FOR TIME STEP 40

I X-LOCATION DISCHARGE AREA DEPTH VELOCITY ELEVATION FROUDE# FRIC.SLOPE TOP WIDTH

1 -0.3936E+00 0.0000E+00 0.8351E-01 0.2122E+00 0.0000E+00 0.2122E+00 0.0000E+00 0.1210E+00 0.3936E+00
 2 -0.3561E+00 0.3857E-03 0.8169E-01 0.2076E+00 0.4721E-02 0.2076E+00 0.1826E-02 0.1252E+00 0.3936E+00
 3 -0.3186E+00 0.7728E-03 0.7982E-01 0.2028E+00 0.9682E-02 0.2028E+00 0.3789E-02 0.1298E+00 0.3936E+00
 4 -0.2811E+00 0.1157E-02 0.7788E-01 0.1979E+00 0.1486E-01 0.1979E+00 0.5888E-02 0.1348E+00 0.3936E+00
 5 -0.2436E+00 0.1535E-02 0.7587E-01 0.1928E+00 0.2023E-01 0.1928E+00 0.8120E-02 0.1402E+00 0.3936E+00
 6 -0.2061E+00 0.1902E-02 0.7378E-01 0.1874E+00 0.2578E-01 0.1874E+00 0.1049E-01 0.1462E+00 0.3936E+00
 7 -0.1686E+00 0.2259E-02 0.7160E-01 0.1819E+00 0.3155E-01 0.1819E+00 0.1303E-01 0.1529E+00 0.3936E+00
 8 -0.1311E+00 0.2602E-02 0.6933E-01 0.1761E+00 0.3753E-01 0.1761E+00 0.1576E-01 0.1602E+00 0.3936E+00
 9 -0.9357E-01 0.2922E-02 0.6694E-01 0.1701E+00 0.4365E-01 0.1701E+00 0.1865E-01 0.1684E+00 0.3936E+00
 10 -0.5607E-01 0.3207E-02 0.6444E-01 0.1637E+00 0.4978E-01 0.1637E+00 0.2168E-01 0.1774E+00 0.3936E+00
 11 -0.1856E-01 0.3455E-02 0.6179E-01 0.1570E+00 0.5591E-01 0.1570E+00 0.2487E-01 0.1876E+00 0.3936E+00
 12 0.1894E-01 0.3662E-02 0.5900E-01 0.1499E+00 0.6208E-01 0.1499E+00 0.2826E-01 0.1991E+00 0.3936E+00
 13 0.5645E-01 0.3817E-02 0.5603E-01 0.1423E+00 0.6812E-01 0.1423E+00 0.3182E-01 0.2124E+00 0.3936E+00
 14 0.9395E-01 0.3906E-02 0.5285E-01 0.1343E+00 0.7390E-01 0.1343E+00 0.3554E-01 0.2277E+00 0.3936E+00
 15 0.1315E+00 0.3909E-02 0.4943E-01 0.1256E+00 0.7908E-01 0.1256E+00 0.3932E-01 0.2458E+00 0.3936E+00
 16 0.1690E+00 0.3841E-02 0.4574E-01 0.1162E+00 0.8396E-01 0.1162E+00 0.4341E-01 0.2680E+00 0.3936E+00
 17 0.2065E+00 0.3565E-02 0.4166E-01 0.1058E+00 0.8559E-01 0.1058E+00 0.4636E-01 0.2932E+00 0.3936E+00
 18 0.2440E+00 0.3463E-02 0.3729E-01 0.9474E-01 0.9286E-01 0.9474E-01 0.5317E-01 0.3360E+00 0.3936E+00
 19 0.2815E+00 0.1839E-02 0.3174E-01 0.8063E-01 0.5795E-01 0.8063E-01 0.3597E-01 0.3274E+00 0.3936E+00
 20 0.3190E+00 0.5631E-02 0.2812E-01 0.7143E-01 0.2003E+00 0.7143E-01 0.1321E+00 0.6947E+00 0.3936E+00
 21 0.3565E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.2003E+00 0.0000E+00 0.1000E+11 0.1000E+11 0.3936E+00

III= 45 ITER= 3 TIME= 0.88 XTIP= 0.38 %VOLUME DIFFERENCE= -3.6
 III= 50 ITER= 3 TIME= 0.98 XTIP= 0.39 %VOLUME DIFFERENCE= -2.9
 III= 55 ITER= 3 TIME= 1.08 XTIP= 0.41 %VOLUME DIFFERENCE= -2.2
 III= 60 ITER= 3 TIME= 1.18 XTIP= 0.42 %VOLUME DIFFERENCE= -1.6
 III= 65 ITER= 3 TIME= 1.28 XTIP= 0.44 %VOLUME DIFFERENCE= -0.9
 III= 70 ITER= 3 TIME= 1.38 XTIP= 0.45 %VOLUME DIFFERENCE= -0.3
 III= 75 ITER= 3 TIME= 1.48 XTIP= 0.46 %VOLUME DIFFERENCE= 0.3
 III= 80 ITER= 3 TIME= 1.58 XTIP= 0.47 %VOLUME DIFFERENCE= 0.9

DETAILED PRINTOUT REQUESTED FOR TIME STEP 80

I X-LOCATION DISCHARGE AREA DEPTH VELOCITY ELEVATION FROUDE# FRIC.SLOPE TOP WIDTH

1 -0.3936E+00 0.0000E+00 0.7950E-01 0.2020E+00 0.0000E+00 0.2020E+00 0.0000E+00 0.1239E+00 0.3936E+00
 2 -0.3503E+00 0.9485E-04 0.7737E-01 0.1966E+00 0.1226E-02 0.1966E+00 0.4873E-03 0.1264E+00 0.3936E+00
 3 -0.3069E+00 0.1899E-03 0.7519E-01 0.1910E+00 0.2526E-02 0.1910E+00 0.1018E-02 0.1291E+00 0.3936E+00
 4 -0.2636E+00 0.2843E-03 0.7297E-01 0.1854E+00 0.3897E-02 0.1854E+00 0.1595E-02 0.1321E+00 0.3936E+00
 5 -0.2202E+00 0.3769E-03 0.7069E-01 0.1796E+00 0.5332E-02 0.1796E+00 0.2217E-02 0.1353E+00 0.3936E+00

6 -0.1769E+00 0.4664E-03 0.6836E-01 0.1737E+00 0.6823E-02 0.1737E+00 0.2885E-02 0.1389E+00 0.3936E+00
7 -0.1336E+00 0.5514E-03 0.6596E-01 0.1676E+00 0.8359E-02 0.1676E+00 0.3598E-02 0.1429E+00 0.3936E+00
8 -0.9021E-01 0.6301E-03 0.6350E-01 0.1613E+00 0.9923E-02 0.1613E+00 0.4354E-02 0.1472E+00 0.3936E+00
9 -0.4687E-01 0.7005E-03 0.6096E-01 0.1549E+00 0.1149E-01 0.1549E+00 0.5146E-02 0.1521E+00 0.3936E+00
10 -0.3533E-02 0.7605E-03 0.5833E-01 0.1482E+00 0.1304E-01 0.1482E+00 0.5969E-02 0.1576E+00 0.3936E+00
11 0.3981E-01 0.8073E-03 0.5560E-01 0.1413E+00 0.1452E-01 0.1413E+00 0.6807E-02 0.1637E+00 0.3936E+00
12 0.8315E-01 0.8379E-03 0.5277E-01 0.1341E+00 0.1588E-01 0.1341E+00 0.7642E-02 0.1706E+00 0.3936E+00
13 0.1265E+00 0.8482E-03 0.4981E-01 0.1266E+00 0.1703E-01 0.1266E+00 0.8435E-02 0.1784E+00 0.3936E+00
14 0.1698E+00 0.8346E-03 0.4671E-01 0.1187E+00 0.1787E-01 0.1187E+00 0.9139E-02 0.1873E+00 0.3936E+00
15 0.2132E+00 0.7883E-03 0.4345E-01 0.1104E+00 0.1814E-01 0.1104E+00 0.9621E-02 0.1974E+00 0.3936E+00
16 0.2565E+00 0.7148E-03 0.4002E-01 0.1017E+00 0.1786E-01 0.1017E+00 0.9872E-02 0.2092E+00 0.3936E+00
17 0.2999E+00 0.5552E-03 0.3635E-01 0.9236E-01 0.1527E-01 0.9236E-01 0.8857E-02 0.2208E+00 0.3936E+00
18 0.3432E+00 0.5078E-03 0.3254E-01 0.8267E-01 0.1561E-01 0.8267E-01 0.9566E-02 0.2411E+00 0.3936E+00
19 0.3865E+00 -0.3867E-03 0.2817E-01 0.7158E-01 -0.1372E-01 0.7158E-01 -0.9040E-02 0.2039E+00 0.3936E+00
20 0.4299E+00 0.2743E-02 0.2523E-01 0.6409E-01 0.1087E+00 0.6409E-01 0.7570E-01 0.5483E+00 0.3936E+00
21 0.4732E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.1087E+00 0.0000E+00 0.1000E+11 0.1000E+11 0.3936E+00

III= 85 ITER= 3 TIME= 1.68 XTIP= 0.48 %VOLUME DIFFERENCE= 1.5
III= 90 ITER= 3 TIME= 1.78 XTIP= 0.49 %VOLUME DIFFERENCE= 2.0
III= 95 ITER= 3 TIME= 1.88 XTIP= 0.50 %VOLUME DIFFERENCE= 2.6
III= 100 ITER= 3 TIME= 1.98 XTIP= 0.51 %VOLUME DIFFERENCE= 3.1
III= 105 ITER= 3 TIME= 2.08 XTIP= 0.52 %VOLUME DIFFERENCE= 3.7
III= 110 ITER= 3 TIME= 2.18 XTIP= 0.53 %VOLUME DIFFERENCE= 4.2
III= 115 ITER= 3 TIME= 2.28 XTIP= 0.54 %VOLUME DIFFERENCE= 4.8
III= 120 ITER= 3 TIME= 2.38 XTIP= 0.55 %VOLUME DIFFERENCE= 5.3

DETAILED PRINTOUT REQUESTED FOR TIME STEP 120

I X-LOCATION DISCHARGE AREA DEPTH VELOCITY ELEVATION FROUDE# FRIC.SLOPE TOP WIDTH

1 -0.3936E+00 0.0000E+00 0.7862E-01 0.1997E+00 0.0000E+00 0.1997E+00 0.0000E+00 0.1246E+00 0.3936E+00
2 -0.3466E+00 0.1759E-04 0.7630E-01 0.1938E+00 0.2305E-03 0.1938E+00 0.9227E-04 0.1266E+00 0.3936E+00
3 -0.2997E+00 0.3480E-04 0.7394E-01 0.1878E+00 0.4707E-03 0.1878E+00 0.1914E-03 0.1288E+00 0.3936E+00
4 -0.2527E+00 0.5141E-04 0.7154E-01 0.1817E+00 0.7187E-03 0.1817E+00 0.2971E-03 0.1312E+00 0.3936E+00
5 -0.2058E+00 0.6681E-04 0.6909E-01 0.1755E+00 0.9670E-03 0.1755E+00 0.4067E-03 0.1338E+00 0.3936E+00
6 -0.1588E+00 0.8040E-04 0.6659E-01 0.1692E+00 0.1207E-02 0.1692E+00 0.5172E-03 0.1367E+00 0.3936E+00
7 -0.1119E+00 0.9142E-04 0.6404E-01 0.1627E+00 0.1427E-02 0.1627E+00 0.6236E-03 0.1398E+00 0.3936E+00
8 -0.6491E-01 0.9901E-04 0.6143E-01 0.1561E+00 0.1612E-02 0.1561E+00 0.7190E-03 0.1432E+00 0.3936E+00
9 -0.1796E-01 0.1022E-03 0.5875E-01 0.1493E+00 0.1739E-02 0.1493E+00 0.7934E-03 0.1470E+00 0.3936E+00
10 0.2900E-01 0.9979E-04 0.5601E-01 0.1423E+00 0.1782E-02 0.1423E+00 0.8324E-03 0.1512E+00 0.3936E+00
11 0.7595E-01 0.9037E-04 0.5317E-01 0.1351E+00 0.1700E-02 0.1351E+00 0.8148E-03 0.1558E+00 0.3936E+00
12 0.1229E+00 0.7233E-04 0.5026E-01 0.1277E+00 0.1439E-02 0.1277E+00 0.7098E-03 0.1610E+00 0.3936E+00
13 0.1699E+00 0.4352E-04 0.4724E-01 0.1200E+00 0.9213E-03 0.1200E+00 0.4687E-03 0.1667E+00 0.3936E+00
14 0.2168E+00 0.2016E-05 0.4411E-01 0.1121E+00 0.4570E-04 0.1121E+00 0.2406E-04 0.1730E+00 0.3936E+00
15 0.2638E+00 -0.5698E-04 0.4085E-01 0.1038E+00 -0.1395E-02 0.1038E+00 -0.7629E-03 0.1798E+00 0.3936E+00
16 0.3107E+00 -0.1296E-03 0.3748E-01 0.9521E-01 -0.3457E-02 0.9521E-01 -0.1974E-02 0.1872E+00 0.3936E+00
17 0.3577E+00 -0.2514E-03 0.3395E-01 0.8626E-01 -0.7404E-02 0.8626E-01 -0.4443E-02 0.1929E+00 0.3936E+00
18 0.4046E+00 -0.2869E-03 0.3037E-01 0.7715E-01 -0.9449E-02 0.7715E-01 -0.5995E-02 0.2034E+00 0.3936E+00
19 0.4516E+00 -0.9167E-03 0.2652E-01 0.6738E-01 -0.3456E-01 0.6738E-01 -0.2347E-01 0.1597E+00 0.3936E+00
20 0.4986E+00 0.1785E-02 0.2373E-01 0.6029E-01 0.7521E-01 0.6029E-01 0.5398E-01 0.4899E+00 0.3936E+00
21 0.5455E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00 0.7521E-01 0.0000E+00 0.1000E+11 0.1000E+11 0.3936E+00

III= 125 ITER= 3 TIME= 2.48 XTIP= 0.55 %VOLUME DIFFERENCE= 5.8

- *Resultados de los perfiles de frente de onda.*

WARAIRA V1.0 NUMERO DE CORRIDAS PARA LOS PERFILES 2

0.19800, 21, 0.00000
 -0.39360, 0.23250
 -0.35611, 0.22918
 -0.31863, 0.23664
 -0.28114, 0.24323
 -0.24365, 0.23273
 -0.20616, 0.20505
 -0.16868, 0.18529
 -0.13119, 0.17715
 -0.09370, 0.16622
 -0.05621, 0.14594
 -0.01873, 0.12548
 0.01876, 0.11322
 0.05625, 0.10776
 0.09374, 0.10495
 0.13122, 0.10152
 0.16871, 0.09114
 0.20620, 0.06968
 0.24369, 0.05303
 0.28117, 0.04556
 0.31866, 0.03694
 0.35615, 0.00000

0.23100, 21, 0.00000
 -0.39360, 0.19401
 -0.35394, 0.19041
 -0.31428, 0.18210
 -0.27462, 0.17215
 -0.23496, 0.17485
 -0.19531, 0.18657
 -0.15565, 0.19047
 -0.11599, 0.17715
 -0.07633, 0.15934
 -0.03667, 0.14910
 0.00299, 0.14135
 0.04265, 0.12647
 0.08231, 0.10804
 0.12197, 0.09581
 0.16162, 0.09274
 0.20128, 0.09370
 0.24094, 0.09357
 0.28060, 0.08749
 0.32026, 0.06309
 0.35992, 0.03877

0.39958,	0.00000
0.26400, 21,	0.00000
-0.39360,	0.17626
-0.35325,	0.17423
-0.31290,	0.17319
-0.27255,	0.16424
-0.23220,	0.15402
-0.19185,	0.15457
-0.15151,	0.16511
-0.11116,	0.17293
-0.07081,	0.16600
-0.03046,	0.15043
0.00989,	0.13996
0.05024,	0.13344
0.09059,	0.12269
0.13094,	0.10769
0.17129,	0.09450
0.21164,	0.08762
0.25198,	0.09067
0.29233,	0.09779
0.33268,	0.08433
0.37303,	0.05154
0.41338,	0.00000

0.29700, 21,	0.00000
-0.39360,	0.16024
-0.35106,	0.15354
-0.30852,	0.14798
-0.26599,	0.14699
-0.22345,	0.14625
-0.18091,	0.13887
-0.13837,	0.12883
-0.09583,	0.12609
-0.05330,	0.13381
-0.01076,	0.14413
0.03178,	0.14491
0.07432,	0.13608
0.11686,	0.12951
0.15939,	0.12773
0.20193,	0.12055
0.24447,	0.10585
0.28701,	0.09139
0.32955,	0.08490
0.37208,	0.08547
0.41462,	0.07951
0.45716,	0.00000

- Solución del Ensayo de Pashias por medio del MatLab 7.0

```

clear all, clc, close all
format long
x=0.5:.5:300;
% a=2.*x./1630.81;
ro=1590;
g=9.81;
h=0.1083;
% r=[.3897;.3786;.3730;.3721;.3846;.3693;.3463;.3693];
%r=[.09295;.0935;.0955;.0941;.0929;.09365;.0946;.09455;.0954;.0958;...
% .0934;.0923;.0923;.0923;.0924;.0923;.0926;.0923;.0925;.0923];

r=[.0323;.0333;.0325;.0385;.0379;.0419;.03785;.0363;.0361;.0368;.0368;.0324;.0359;.
0375;.036;.035;.0398;.0366;.0358;.0377];

%r=[.0661;.0673;.0679;.068;.06665;.0683;.0708;.0683;.068;.0661;.0645;.0653;.0643;.
0661;.0653;.0643;.0683;.0663;.0658;.0673]

%r=[.0573;.0595;.0579;.0593;.0583;.0578;.0683;.0603;.0579;.0581;.0628;.0581;.058;.
0579;.0588;.0581;.0573;.0593;.058;.0579]
i=1;
for i=1:20
    y=-r(i,1)/h + 1 - (2.*x./ro*g*h).*(1 - log(2.*x/ro*g*h));
    % y=-r(i,1) + h - (2.*x./ro*g).*(1 - log(2.*x/ro*g*h));
    y0=zeros(size(x));
    y=abs(y);
    m=min(y);
    p=find(m==y);
    raiz(i,1)=x(1,p);
    xx=x(1,p)
    yy=y(1,p)
    hold on
plot(x,y)
plot(x,y0)
hold off
figure
end

```

ANEXOS

Anexos A. Imágenes de los instrumentos de medición no convencional de esfuerzo de cedencia.

- Penetrómetro

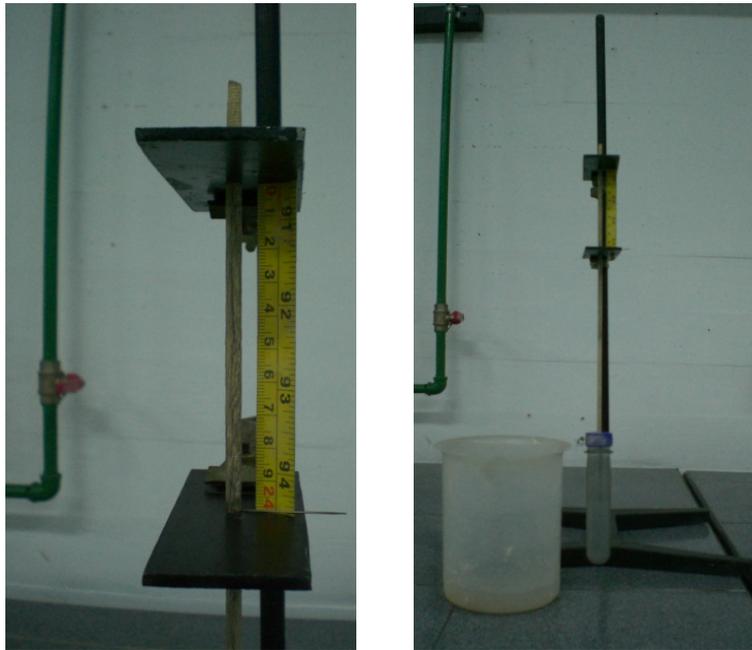


Figura A1 Penetrómetro.

- Prueba de Pashias.



+

Figura A.2 Prueba de Pashias

- Reómetro de Bola.



Figura A.3 Reómetro de Bola.

Anexos B. Imágenes del modelo físico reducido canal.



Figura B.1 Modelo Físico reducido Canal