

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS CON EL REÓMETRO DE BOLA RODANTE

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.:

García Henríquez, Rafael David

Vallez Yáñez, Jesús Manuel

Para optar al Título de “Ingeniero Mecánico”

Caracas, 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ANÁLISIS DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS CON EL REÓMETRO DE BOLA RODANTE

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rodolfo Berrios

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.:

García Henríquez, Rafael David

Vallez Yáñez, Jesús Manuel

Para optar al Título de “Ingeniero Mecánico”

Caracas, 2014



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA

Caracas, 14 de octubre de 2014

ACTA

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

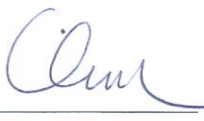
García, Rafael y Vallez Jesús

Titulado: *"Análisis de Flujos Hiperconcentrados con el
Reómetro de Bola Rodante"*

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


Prof. *Jesús León*
Jurado




Prof. *Cristóbal Quevedo*
Jurado


Prof. *Rodolfo Berrios*
Tutor

"50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales"

DEDICATORIA

A mis padres, Juanita y Rafael, quienes con su apoyo y cariño incondicional han sido para mí unos guías, aunque siempre respetando mis decisiones en cuanto al camino.

A mi abuela Consuelo, quien me hubiese gustado tener a mi lado en esta victoria.

A mi hermana María, quien por su buen corazón me recuerda siempre que todavía existen personas por las cuales vale la pena luchar.

A mis amigos, y mucho más que eso, a mis Camaradas Jesús, Aarón y Reinaldo con quienes apenas inicio un camino que estará lleno de triunfos.

A Hugo Chávez, quién me dio los mayores ejemplos de dedicación, empeño y trabajo, los cuales son herramientas imprescindibles de todo revolucionario.

Rafael David García Henríquez

DEDICATORIA

A Hugo Chávez, quien me enseñó, a través de su ejemplo, la cualidad más hermosa de cualquier ser humano: ser un revolucionario.

A mis padres, María Luisa y Luis, por traerme al mundo e inculcarme los más bellos valores, por su amor y su apoyo incondicional.

A mi hermana, Luisana, de quien tuve que separarme cuando aún era una niña, pero que estuvo siempre en mi corazón.

A Flor Herrera y Luisa Flor Quijada, quienes se han convertido en otras madres para mí y me han demostrado su amor de infinitas maneras.

A mis camaradas más cercanos, Rafael, Reinaldo y Aarón, con quienes emprendí esta batalla táctica, como pequeña parte de una batalla estratégica que se alimenta con el sueño de tener un mundo mejor.

Y muy especialmente, a la hermosa Marianna Alejandra, mi amor, compañera de tantas batallas, de alegrías y tristezas, de sueños y esperanzas, quien luchó junto a mí en todo momento, tuvo la enorme tarea de tenerme paciencia y cada día con su amor me hizo sentir inmensamente feliz.

Jesús Manuel Vallez Yanez

AGRADECIMIENTOS

Estos agradecimientos están dirigidos a todas aquellas personas que de manera solidaria y desinteresada colaboraron, en menor o mayor medida, a la realización del presente trabajo de investigación.

En primer lugar, al Ing. Reinaldo Díaz, por aportar las ideas fundamentales que hicieron posible este trabajo. Junto a su persona, conformamos un gran equipo que presentó altibajos, pero que superó todas y cada una de las dificultades existentes.

A la Ing. Marianna Sánchez y a la Dra. Flor Herrera, por dar sugerencias constantemente, motivar al equipo de trabajo en cada una de las etapas y brindar su experiencia en lo concerniente a la redacción y edición de este trabajo.

Al personal del Centro de Ingeniería Mecánica de la Fundación Instituto de Ingeniería, por el apoyo brindado en la construcción del instrumento con el cual se realizaron las pruebas. Muy especialmente al Ing. Raynier Estrada, Gabriella Grunert, José Ángel Pérez, Diego Rodríguez, Luis Pérez, Humberto Mota, David Madrid y Jeckson Vergara.

Al personal del Taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, por brindarnos su apoyo ante las diferentes eventualidades. De igual manera, al personal administrativo, muy especialmente a Oneida.

A los diferentes compañeros de estudio que colaboraron solidariamente, a Christian Mavarez, Jesús Dimas, José Parada y Aarón Rodríguez.

Por último, a los distintos profesores que brindaron su experiencia, al Prof. Enrique Limongi, Miguel Baritto y muy especialmente a nuestro tutor académico Rodolfo Berrios.

García H. Rafael D.; Vallez Y. Jesús M.

ANÁLISIS DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS CON EL REÓMETRO DE BOLA RODANTE

Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berríos

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2014, (167 págs.).

Palabras Clave: reología, flujos hiperconcentrados, reómetro de bola rodante.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se basa en el estudio del comportamiento reológico de flujos hiperconcentrados a través de un instrumento alternativo denominado reómetro de bola rodante. El equipo fue construido y probado con muestras de matrices granulares finas con distintas concentraciones en volumen (15%, 20% y 25%) preparadas con mezclas de agua y caolín. De esta manera, se probaron configuraciones con diferentes relaciones de diámetro de bola y de tubo. (0,46; 0,67; 0,84 y 0,89) en distintas inclinaciones (desde el ángulo correspondiente al esfuerzo de cedencia hasta un límite superior de 60°), obteniendo parámetros reológicos equivalentes que fueron aproximados al modelo de Herchell-Bulkley y calibrados por medio de los datos aportados por el investigador Phillippe Coussot. Lo anterior permitió la realización de reogramas del material ensayado, proporcionando valiosa información que sirve de apoyo a futuras investigaciones relacionadas a la elaboración de estrategias de mitigación y control del fenómeno de los aludes torrenciales. Las curvas obtenidas mostraron un comportamiento similar a las curvas de referencia. Se pudo constatar que la relación de diámetros que generó mejores resultados fue la correspondiente a $d/D=0,83$ en el rango de concentraciones entre 15% y 20%, mientras que relación $d/D=0,67$ proporciono resultados aceptables para la concentración de 25%. Al comparar los valores de esfuerzo de cedencia y esfuerzo de corte a bajas tasas de deformación se pudo evidenciar mínimas variaciones, lo cual permite verificar la utilidad de este equipo en la caracterización de flujos hiperconcentrados. Este trabajo proporciona, además, un protocolo de ensayo para la realización de las pruebas en el dispositivo y los resultados de una simulación numérica (realizada utilizando el software Ansys-CFX) que permiten validar los resultados obtenidos experimentalmente.

García H. Rafael D.; Vallez Y. Jesús M.

**ANALYSIS OF HYPERCONCENTRATED FLOWS WITH THE
ROLLING BALL RHEOMETER**

Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2014, (167 págs.).

Key words: rheology, hyperconcentrated flow, rolling ball rheometer.

ABSTRACT

The present research is based on the study of the rheological behavior of hyperconcentrated flows through an instrument called rolling ball rheometer. The equipment was built and tested with samples of fine granular matrices with different volume concentrations (15%, 20% and 25%) which were prepared by mixing water and kaolin. Configurations with different ratio of ball diameter to tube diameter (0.46, 0.67, 0.84 y 0.89) were tested in different inclinations (from the angle corresponding to the yield stress to an upper limit of 60) to obtain equivalent rheological parameters. These configurations were approximated to Herschell-Bulkley model and calibrated using the data obtained by the researcher Phillipe Coussot. This allowed the construction of rheograms of the tested material, providing valuable information that could support future research related to the development of strategies to mitigate and control the hyperconcentrated flows phenomenon. The obtained curves describe a similar behavior to the reference curve. The diameter ratio that generated the best results was the corresponding to $d/D=0.83$ in the concentration range between 15% and 20%, while the ratio $d/D = 0.67$ provided acceptable results for the concentration of 25%. The values of yield stress and shear stress at low shear rates were very close, which verifies the usefulness of this equipment in the hyperconcentrated flow analysis. In addition, this work provides a protocol for testing hyperconcentrated flows in the equipment and the results of a numerical simulation (performed using the Ansys-CFX software) that allows to check the results obtained experimentally.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xvi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxi
TABLA DE NOMENCLATURAS	xxiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Antecedentes	5
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos Específicos	8
1.4 Justificación	9
1.5 Alcances.....	11
CAPÍTULO II	13
MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 FLUJOS COMO MOVIMIENTOS DE MASA.....	14
2.2 Aludes torrenciales	15
2.3 Clasificación de los aludes torrenciales	18
2.3.1 Pierson y Costa (1987)	19
2.3.2 Costa (1988)	20
2.3.3 Coussot (1992)	22
2.3.4 Coussot y Meunier (1996).....	22
2.3.5 O’Brien y Julien (1988).....	23
2.3.6 Hungr, Evans, Boris y Hutchinson (2001)	24
2.4 Mecanismos de soporte de partículas	26

2.4.1	Cohesión.....	27
2.4.2	Flotabilidad.....	27
2.4.3	Presiones dispersivas.....	28
2.4.4	Turbulencia.....	28
2.5	Reología de suspensiones concentradas	29
2.5.1	Efectos de la concentración.....	29
2.5.2	Efectos de la distribución de tamaños de partículas.....	30
2.5.3	Efectos del pH y cambios electrolíticos	30
2.6	experimentación en la reología de aludes torrenciales	31
2.6.1	Reómetros rotacionales	31
2.6.1.1	Reómetro de cilindros concéntricos	32
2.6.1.2	Reómetro de placas paralelas.....	33
2.6.1.3	Reómetro de cono-placa.....	34
2.6.2	Reómetro de plano inclinado.....	36
2.7	Reómetro de bola rodante.....	38
2.7.1	Principios y leyes fundamentales	39
2.7.1.1	Principio de Arquímedes.....	39
2.7.1.2	Fuerza de arrastre	40
2.7.1.3	Ley de Stokes	40
2.7.2	Expresiones analíticas del reómetro de bola rodante para fluidos newtonianos	41
2.7.3	Expresiones analíticas del reómetro de bola rodante para fluidos no newtonianos	42
2.8	Dinámica de Fluidos Computacional.....	47
CAPÍTULO III.....		53
MARCO METODOLÓGICO.....		53
3.1	Diseño y construcción del reómetro de bola rodante.....	53
3.1.1	Base o soporte del instrumento	54
3.1.2	Mecanismo de posicionamiento angular	54
3.1.3	Tubos acrílicos, tapas y sellos	55
3.1.4	Componente para la sujeción de los tubos acrílicos.....	56
3.2	Determinación de los factores controlables	56
3.2.1	Concentración.....	56

3.2.2	Relación de diámetro de bola y diámetro de tubo	57
3.2.3	Ángulo de inclinación del instrumento	58
3.3	Diseño factorial de experimentos	59
3.4	Materiales utilizados para las pruebas	60
3.5	Procedimiento teórico para la preparación de las mezclas	62
3.6	Procedimiento experimental para la preparación de las mezclas	63
3.6.1	Determinación teórica de la densidad	64
3.6.2	Determinación experimental de la densidad.....	65
3.7	Obtención de los parámetros reológicos	66
3.8	Calibración del instrumento.....	67
3.9	Cálculo de la incertidumbre por repetibilidad	68
3.10	Simulación numérica del reómetro de bola rodante.....	69
3.10.1	Identificación del Dominio	69
3.10.2	Hipótesis.....	69
3.10.3	Creación de geometría tridimensional	69
3.10.4	Mallado	71
3.10.5	Condiciones de Borde	71
3.10.5.1	Tapa 1	72
3.10.5.2	Tapa 2	72
3.10.5.3	Tapa Exterior del Fluido.....	73
3.10.5.4	Simetría	73
3.10.5.5	Esfera.....	74
CAPÍTULO IV	.....	75
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	.....	75
4.1	cálculo de masa de agua y caolín.....	75
4.2	Densidad teórica y experimental.....	75
4.3	Rango de los factores controlables	76
4.3.1	Concentración.....	76
4.3.2	Ángulos de inclinación	77
4.4	Diseño factorial de experimentos	78
4.5	Protocolo de ensayo para la realización de pruebas con flujos hiperconcentrados en el reómetro de bola rodante.....	79
4.5.1	Metodología para la preparación de mezclas de Agua-Caolín	80

4.5.2	Metodología para la toma de datos experimentales	81
4.6	Resultados de pruebas experimentales	82
4.6.1	Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,67$	82
4.6.1.1	Calibración del reómetro de bola rodante ($d/D=0,67$)	84
4.6.1.2	Comparación entre los resultados obtenidos ($d/D=0,67$) y los datos reométricos de Coussot	86
4.6.2	Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,83$	90
4.6.2.1	Calibración del reómetro de bola rodante ($d/D=0,83$)	91
4.6.2.2	Comparación entre los resultados obtenidos ($d/D=0,83$) y los datos reométricos de Coussot	92
4.6.3	Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,46$	95
4.6.3.1	Calibración del reómetro de bola rodante ($d/D=0,46$)	96
4.6.3.2	Comparación entre los resultados obtenidos ($d/D=0,46$) y los datos reométricos de Coussot	97
4.6.4	Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,89$	99
4.6.4.1	Calibración del reómetro de bola rodante ($d/D=0,89$)	100
4.6.4.2	Comparación entre los resultados obtenidos ($d/D=0,89$) y los datos reométricos de Coussot	100
4.7	Incertidumbre por repetibilidad	102
4.8	Consideraciones generales de las pruebas experimentales	103
4.9	Simulación Numérica	104
4.9.1	Convergencia de Malla	104
4.9.2	Inicio del movimiento de la esfera	107
4.9.3	Simulación del flujo desarrollado	111
CAPÍTULO V	.....	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	115
5.1	CONCLUSIONES	115
5.2	RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	119
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	.....	126
APÉNDICE A	.....	128
MODELOS REOLÓGICOS	.....	128
A.1.1	Modelo de Bingham	128

A.1.2 Modelo Pseudoplástico	129
A.1.3 Modelo Dilatante.....	129
A.1.4 Modelo de Herschel-Bulkley	130
ANEXOS	131
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Clasificación de los flujos según la concentración de sedimentos	21
Tabla 2. 2. Clasificación de los flujos según el mecanismo de soporte de sedimentos	21
Tabla 2. 3. Clasificación de los Flujos Hiperconcentrados según O'Brien y Julien.....	24
Tabla 2. 4. Clasificación de deslizamientos en forma de flujo según Hungr y otros	25
Tabla 2. 5. Escala de velocidades de deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes.....	26
Tabla 2. 6. Cuadratura numérica gaussiana	44
Tabla 3. 1. Dimensiones del Alojamiento del Sello para cada sistema de tapas	56
Tabla 3. 2. Combinaciones de diámetros de bola y tubo	58
Tabla 3. 3. Composición química del caolín utilizado	61
Tabla 3.4. Estudio granulométrico del caolín utilizado	61
Tabla 3.5. Características del Cuerpo Rígido	74
Tabla 4.1. Masa de agua y masa de caolín utilizadas en la preparación de la mezcla.....	75
Tabla 4.2. Densidad teórica y experimental de la mezcla agua-caolín.....	75
Tabla 4.3. Rango útil de concentraciones según la relación de diámetros	76
Tabla 4.4. Rango de ángulos de inclinación según la relación de diámetros	77
Tabla 4.5. Número mínimo de experimentos a realizar.....	78
Tabla 4.6. Número total de experimentos realizados.....	79
Tabla 4.7. Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola mediana -Tubo mediano	85
Tabla 4.8. Calibración de la consistencia para Bola mediana -Tubo mediano	85
Tabla 4.9. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola mediana -Tubo mediano	85

Tabla 4.10 . Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola pequeña -Tubo pequeño.....	91
Tabla 4.11. Calibración de la consistencia para Bola pequeña -Tubo pequeño	92
Tabla 4.12. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola pequeña -Tubo pequeño.....	92
Tabla 4.13. Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola pequeña -Tubo mediano	96
Tabla 4.14. Calibración de la consistencia para Bola pequeña -Tubo mediano	97
Tabla 4.15. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola pequeña -Tubo mediano	97
Tabla 4.16. Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola grande -Tubo grande	100
Tabla 4.17. Calibración de la consistencia para Bola mediana -Tubo mediano ...	100
Tabla 4.18. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola grande -Tubo grande	100
Tabla 4.19. Incertidumbre por repetibilidad según la relación de diámetros y la concentración.....	102
Tabla 4.20. Valores de error de la desviación media cuadratica (RMSE) según relación de diámetros.....	103
Tabla 4.21. Configuración de Mallas	105

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 15 %	83
Gráfico 4.2. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 20 %	83
Gráfico 4.3. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 25 %	84
Gráfico 4.4. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 15 %	86
Gráfico 4.5. Comparación entre la curva “Viscosidad aparente vs Tasa de deformación” obtenida para bola mediana y tubo mediano y la realizada por Coussot, con una concentración en volumen de 15 %	87
Gráfico 4.6. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%	87
Gráfico 4.7. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%	88
Gráfico 4.8. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 25%	88
Gráfico 4.9. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 25%	89

Gráfico 4.10. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 15 %	90
Gráfico 4.11. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 20%	91
Gráfico 4.12. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 15%	93
Gráfico 4.13. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 15%	93
Gráfico 4.14. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 20%	94
Gráfico 4.15. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 20%	94
Gráfico 4.16. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola pequeña y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%	96
Gráfico 4.17. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%	98
Gráfico 4.18. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%	98
Gráfico 4.19. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola grande y tubo grande con una concentración en volumen de 20%	99

Gráfico 4.20. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola grande y tubo grande con una concentración en volumen de 20%	101
Gráfico 4.21. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola grande y tubo grande con una concentración en volumen de 20%	101
Gráfico 4.22. Convergencia de Malla.....	105
Gráfico 4.23. Cambio de la velocidad lineal de la esfera [mm/s] Vs Paso de Tiempo.....	108
Gráfico 4.24. Aceleración lineal [mm/s ²] Vs Paso de Tiempo	108
Gráfico 4.25. Distancia Recorrida [mm] Vs Paso de Tiempo	109
Gráfico 4.26. Velocidad lineal de la esfera [cm/s] Vs Paso de Tiempo	112
Gráfico 4.27. Aceleración Lineal [cm/s ²] Vs Paso de Tiempo	112
Gráfico 4.28. Desplazamiento [cm] Vs Paso de Tiempo.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Esquema de un flujo	14
Figura 2. 2. Alud torrencial ocurrido en Vargas en diciembre de 1999.....	15
Figura 2. 3. Partes de un flujo típico de detritos	16
Figura 2. 4. Morfología en planta de una zona que ha sufrido un deslizamiento de tierra.....	17
Figura 2. 5. Clasificación de flujos en función de la Concentración Volumétrica y la Velocidad Media del Flujo.....	20
Figura 2. 6. Clasificación de los flujos según la concentración volumétrica y contenido de material fino.....	22
Figura 2. 7. Clasificación de los flujos como función de la fracción sólida y el tipo de material.....	23
Figura 2. 8. Reómetro de cilindros concéntricos	32
Figura 2. 9. Reómetro de placas paralelas	34
Figura 2. 10. Reómetro de cono-placa	35
Figura 2. 11. Canal rectangular inclinado para el estudio de flujos no newtonianos	36
Figura 2. 12. Reómetro de bola rodante.....	39
Figura 2. 13. Patrón de flujo en el reómetro de bola rodante.....	43
Figura 2. 14. Malla estructurada bidimensional.....	48
Figura 2. 15. Diagrama de proceso de Simulación en CFD.....	50
Figura 2. 16. Diagrama de los pasos del Pre-Procesamiento en CFD	50
Figura 2. 17. Diagrama de los pasos del Procesamiento en CFD	51
Figura 2. 18. Diagrama de los pasos del Post-Procesamiento en CFD	51
Figura 3. 1. Reómetro de bola rodante construido.....	53
Figura 3. 2. Sistema para la medición de ángulos.....	59
Figura 3. 3. Mezcla Agua-Caolín.....	64
Figura 3. 4. Balanza llena con Mezcla de Agua-Caolín.....	66

Figura 3. 5. Vista isométrica del reómetro de bola rodante	70
Figura 3. 6. Vista frontal del reómetro de bola rodante	70
Figura 3. 7. Condición de Borde de la Tapa 1	72
Figura 3. 8. Condición de Borde Tapa 2	72
Figura 3. 9. Condición de Borde de Tapa Exterior	73
Figura 3. 10. Condición de borde de Simetría	73
Figura 3. 11. Condición de borde de Esfera Rígida.....	74
Figura 4.1. Vista Isométrica de la Malla seleccionada	106
Figura 4.2. Vista frontal de la Malla seleccionada.....	107
Figura 4.3. Vista Frontal del Método “Inflation” aplicado alrededor de la esfera	107
Figura 4.4. Distribución de Velocidades alrededor de la esfera en el inicio del movimiento	110
Figura 4.5. Comparación del Perfil de Velocidad obtenido numéricamente y el perfil de Velocidad teórico.....	114
Figura A.1. 1. Modelos reológicos.....	128

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 15\%$	132
Anexo 2. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 15\%$	133
Anexo 3. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 15\%$	134
Anexo 4. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 15\%$	135
Anexo 5. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 20$	136
Anexo 6. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 20\%$	137
Anexo 7. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 20\%$	138
Anexo 8. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 20\%$	139
Anexo 9. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 25\%$	140
Anexo 10. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 25\%$	141
Anexo 11. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 25\%$	141
Anexo 12. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v = 25\%$	142
Anexo 13. Bola Pequeña-Tubo Pequeña $C_v = 15\%$	143
Anexo 14. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Pequeña-Tubo Pequeño $C_v = 15$	144
Anexo 15. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Pequeña-Tubo Pequeño $C_v = 15\%$	145
Anexo 16. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Pequeña-Tubo Pequeño $C_v = 15\%$	146

Anexo 17. Bola Pequeña-Tubo Pequeña Cv= 20%	147
Anexo 18. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Pequeña-Tubo Pequeño	148
Cv= 20%	148
Anexo 19. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Pequeña-Tubo Pequeño	
Cv= 20%	149
Anexo 20. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Pequeña-Tubo Pequeño Cv=	
20%	149
Anexo 21. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv= 20%	150
Anexo 22. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv=	
20%	150
Anexo 23. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Pequeña-Tubo Mediano	
Cv= 20%	151
Anexo 24. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv=	
20%	151
Anexo 25. Bola Grande-Tubo Grande Cv= 20%	152
Anexo 26. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Grande-Tubo Grande Cv=	
20%	153
Anexo 27. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Grande-Tubo Grande Cv=	
20%	153
Anexo 28. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Grande-Tubo Grande Cv=	
20%	154
Anexo 29. Plano del reómetro de bola rodante	155
Anexo 30. Ensamblaje de las partes principales del reómetro de bola rodante	156
Anexo 31. Detalle de las patas del trípode del reómetro.....	157
Anexo 32. Pieza de acoplamiento de las patas del tripode.....	158
Anexo 33. Patas del trípode.....	159
Anexo 34. Lámina de fijación de las patas del trípode.....	160
Anexo 35. Tubo sostenedor perteneciente a la base.....	161
Anexo 36. Placa cuadrada de fijación del trípode	162
Anexo 37. Base del mecanismo de posicionamiento angular	163
Anexo 38. Rejilla del mecanismo de posicionamiento angular	164

TABLA DE NOMENCLATURAS

C_v	Concentración en volumen
d	Diámetro de la bola del reómetro de bola rodante
D	Diámetro del tubo del reómetro de bola rodante
g	Gravedad
h	Altura
h_c	Altura Crítica
J_1	Constante igual a 0,398
K	Índice de consistencia del modelo de Hershel-Bulkley
K_{ref}	Índice de consistencia de referencia para la calibración
k_1	Constante de calibración del reómetro de bola rodante
k_2	Constante de calibración del reómetro de bola rodante
k_3	Constante de calibración del reómetro de bola rodante
L	Longitud del tubo del reómetro de bola rodante
m	Parámetro para fluidos de Ley de Potencia
M	Par de fuerzas de un reómetro de cilindros concéntricos
M_{agua}	Masa de agua
$M_{agua\ mod}$	Masa de agua modificada
M_{Caolin}	Masa de caolín
$M_{Caolin\ mod}$	Masa de caolín modificada
M_{mezcla}	Masa de la mezcla
n	Índice de fluido de Hershel-Bulkley
n_r	Número de repeticiones de los ensayos realizados
n_{ref}	Índice de fluido de Hershel-Bulkley de referencia para la calibración
p	Presión
p_0	Presión atmosférica
P	Presión dispersiva

q	Caudal por unidad de ancho
s	Desviación estándar
t	Tiempo
u	Componente de la velocidad en la dirección del eje X
U	Velocidad teórica de la bola
v	Componente de la velocidad en la dirección del eje Y
V	Adimensionamiento de la velocidad
V_{agua}	Volumen de agua
V_{Caolin}	Volumen de caolín
$V_{\text{media bola}}$	Velocidad media de la bola en el reómetro de bola rodante
V_{Mezcla}	Volumen de la mezcla
V_s	Superficie libre
w	Componente de la velocidad en la dirección del eje Z
Y	Adimensionamiento de la posición en el eje Y

Letras griegas

α	Ángulo del plano Inclinado
β	Ángulo de inclinación del reómetro de bolo rodante
γ	Tasa de deformación
ζ	Función de la tasa de deformación
η_{aparente}	Viscosidad aparente
η_{pl}	Viscosidad plástica de Bingham
θ	Ángulo dinámico de fricción interna
λ	Concentración lineal de granos
μ	Viscosidad newtoniana
ρ	Densidad
ρ_{agua}	Densidad del agua
ρ_{b}	Densidad de la bola
ρ_{Caolin}	Densidad del caolín
ρ_{f}	Densidad del fluido
ρ_{mezla}	Densidad de la mezcla
$\rho_{\text{sólido}}$	Densidad del sólido sumergido en un fluido
τ	Esfuerzo Cortante
τ_{c}	Esfuerzo de cedencia
$\tau_{\text{c ref}}$	Esfuerzo de cedencia utilizado de referencia para la calibración
τ_{p}	Magnitud del esfuerzo cortante en la pared
ϕ	Parámetro de esfuerzo de corte equivalente
Ω	Velocidad angular de un reómetro de cilindros concéntricos

INTRODUCCIÓN

Los aludes torrenciales son flujos con altas concentraciones de sedimentos (hiperconcentraciones) generados en las cuencas montañosas durante lluvias prolongadas y de alta intensidad que poseen un enorme potencial destructivo. En el año 1999, se presentó en Venezuela un evento de este tipo, conocido como la Tragedia de Vargas, produciendo exorbitantes pérdidas humanas y materiales. A partir de ese momento, se despertó en la comunidad científica venezolana un notable interés en el estudio de estos flujos y la posibilidad de reducir la vulnerabilidad ante los mismos.

El estudio de los aludes torrenciales presenta gran nivel de complejidad, debido a que la cantidad de elementos que lo componen dificulta la predicción de su comportamiento. La determinación de las propiedades reológicas del flujo representa un elemento de mucha importancia en lo que concierne a la elaboración de estrategias de mitigación y control. Los estudios correspondientes se han realizado ensayando muestras que van desde material real hasta muestras artificiales, utilizando diferentes equipos. Sin embargo, el alto costo de los dispositivos y las dificultades en su manejo representan una limitación para los investigadores en esta área.

El presente Trabajo Especial de Grado está orientado al estudio del comportamiento reológico de flujos hiperconcentrados con un instrumento de fácil construcción, bajo costo y uso sencillo que es denominado “reómetro de bola rodante”.

En este sentido, el trabajo se desarrolla por medio de cuatro (4) capítulos que se describen brevemente a continuación:

Capítulo I. Se presenta el *planteamiento del problema*, en donde se aborda los temas relacionados con este trabajo; los *objetivos* que se plantean para el desarrollo de esta investigación; la *justificación* en donde se especifica la importancia de esta investigación y los *alcances* de la misma

Capítulo II. *Marco Teórico*. En este capítulo se presentan los aspectos teóricos y referenciales que enmarcan el contenido de esta investigación. Se abordan y desarrollan diferentes temas enmarcados en el estudio de los aludes torrenciales, así como las diferentes técnicas reométricas utilizadas para su análisis. De igual forma, se presenta un apartado donde se explica lo referente a la dinámica de fluidos computacional (CFD).

Capítulo III. *Método*. Se detalla y explica el procedimiento y las etapas llevadas a cabo para la construcción del reómetro de bola rodante, el diseño del experimento, la preparación del fluido de trabajo y la realización de los ensayos. Adicionalmente, este capítulo aborda pasos necesarios para la simulación numérica realizada.

Capítulo IV. *Resultados y Discusión*. En este capítulo se presentan todas las tablas y gráficas realizadas con los datos obtenidos en los ensayos con el reómetro de bola rodante. Asimismo, se presentan los resultados generados por la simulación numérica. Finalmente, se analizan y comparan los resultados obtenidos tanto de forma teórica como experimental

CAPÍTULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los aludes torrenciales son flujos hiperconcentrados generados en las cuencas montañosas como producto de los deslizamientos ocasionados por largos periodos de lluvia. Los mismos “pueden estar conformados por una mezcla de agua con barro, rocas y grandes restos de vegetación, así como por todo tipo de desperdicios y arrastres de materiales fabricados por el hombre” (López, 2006)

En sus inicios, las investigaciones correspondientes a los flujos hiperconcentrados trataron de abordarse en el marco de la mecánica de fluidos tradicional, sin embargo la reología no era bien representada debido a que, como se expuso anteriormente, no se trata de fluidos convencionales sino de un flujo de características complejas.

Los investigadores han utilizado diferentes instrumentos para la medición de las propiedades reológicas de los flujos hiperconcentrados, presentándose dificultades relacionadas con perturbaciones en los equipos, dentro de las cuales se presenta, por ejemplo, la incrustación de partículas muy finas en las partes que lo componen. Hay que destacar que los dispositivos convencionales solo pueden trabajar con un rango limitado de tamaño de partícula, lo cual produce que la muestra sea menos representativa. Es importante precisar, además, el elevado costo de estos equipos, generando limitaciones en aquellos laboratorios que no cuentan con los recursos necesarios para su adquisición.

Este trabajo de investigación se propone el estudio del comportamiento reológico de los flujos hiperconcentrados con un dispositivo no convencional, de fácil construcción, bajo costo y uso sencillo, que es denominado reómetro de bola rodante, el cual, aun cuando no ha sido utilizado en el análisis de muestras de

estas características, ha demostrado su potencial en el estudio de flujos reológicamente complejos (no newtonianos) (Bricoe, Luckham y Ren, 1991).

1.2 ANTEDECENDES

Debido a las limitaciones de los reómetros convencionales, los cuales solo pueden ensayar partículas hasta un determinado tamaño (0,25 mm aproximadamente), se han desarrollado diferentes equipos y dispositivos alternativos con la intención de estudiar el comportamiento de los aludes torrenciales, los mismos representan antecedentes del presente trabajo de investigación.

En este sentido, Savage y McKeown (1980) estudiaron suspensiones concentradas de partículas a través de un dispositivo de cilindros concéntricos. En este, el cilindro interior rotaba mientras que el cilindro exterior permanecía fijo, teniendo ambas paredes rugosas.

Más adelante, Savage estudió en conjunto con Sayed (1983) diferentes muestras granulares secas en una celda con dos placas paralelas. En este dispositivo la placa superior permanece fija mientras la placa inferior rota a diferentes velocidades específicas.

Asimismo, O'Brien (1986) diseñó un viscosímetro formado por dos cilindros concéntricos para operarlo a bajas velocidades de corte, con la intención de ensayar muestras de alta concentración sin que estas deslizaran por las paredes del cilindro. Tiempo después (1988), este investigador junto a Julien, utilizó este dispositivo para estudiar muestras de un flujo de lodo real con un rango amplio de velocidades de corte.

En el año 1991, Phillips y Davies diseñaron y construyeron un reómetro de cono invertido a 30°, el cual contaba con un diámetro de 40 cm. En el dispositivo estudiaron muestras reales de aludes torrenciales, logrando estimar su comportamiento reológico.

De manera similar, Coussot y Piau (1995) estudiaron aludes torrenciales a través de un reómetro de cilindros concéntricos. Luego, en 1998, Coussot utilizó un dispositivo convencional de placas paralelas para estudiar mezclas de partículas de mayor tamaño que en su experiencia anterior, obteniendo resultados satisfactorios.

Debido a la imposibilidad de analizar granulometrías completas en este tipo de dispositivos, diversos investigadores optaron por la construcción de canales, algunos con mayor grado de sofisticación que otros. De dichas experiencias, es importante mencionar las desarrolladas por: El USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) (1999), Coussot y Boyer (1995), Parson, Kelin y Simoni (2001) y Delinger e Iverson (2001).

Asimismo, algunos investigadores han propuesto otros equipos innovadores para la determinación de las propiedades reológicas de estos flujos. Entre ellos: Johnson y Martosudarmo (1997) diseñaron el viscosímetro de mango rodante, Ancy (2001) usó un reómetro tipo molinete rotatorio y Wang y Jan (2002) utilizaron un reómetro rotacional de disco.

Como se puede notar, el reómetro de bola rodante no ha sido utilizado anteriormente en el ensayo específico de estos flujos. Dicho instrumento se ha usado generalmente en el estudio de fluidos newtonianos, aunque algunos investigadores han avanzado en su utilización en el estudio de flujos no newtonianos.

De esta manera, el primero en descubrir la potencialidad del reómetro de bola rodante fue Flowers (1914), dicho autor demostró que el instrumento podía usarse para comparaciones de viscosidad absoluta, obteniendo errores leves en rangos amplios. Más adelante, Hersey (1916) realizó un análisis dimensional del

comportamiento de este dispositivo. Asimismo, Block (1942), Hubbard (1943) y Lewis (1953) trataron de relacionar la velocidad de rodadura de la bola con la viscosidad del fluido.

Es importante destacar el estudio realizado por Sestak y Ambros (1972), quienes utilizaron el reómetro de bola rodante para medir parámetros reológicos de fluidos no newtonianos (fluidos de ley de potencia). Tiempo después (1991), Briscoe, Luckham y Ren, evaluaron la factibilidad del uso del instrumento para la caracterización reológica de fluidos no newtonianos, incluyendo los fluidos plásticos de Bingham y fluidos de la ley de la potencia

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Analizar flujos hiperconcentrados con el reómetro de bola rodante.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un protocolo de ensayo para la realización de pruebas con flujos hiperconcentrados en el reómetro de bola rodante.
- Caracterizar flujos hiperconcentrados con el reómetro de bola rodante.
- Calibrar un modelo de simulación numérica a partir de los datos obtenidos experimentalmente.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La tragedia de Vargas ocurrida en el año 1999 representa uno de los desastres naturales más importantes en la historia de Venezuela, el cual trajo consigo múltiples pérdidas humanas y materiales.

Antecedentes previos alertaban que el Litoral Central representa una zona de alto riesgo sujeta a continuas inundaciones, como ya habían ocurrido anteriormente en los años 1798, 1912, 1938, 1944, 1948, 1951 y 1954 (López, 2006). Puede notarse cierta periodicidad en dicho fenómeno, el cual se repite en menor o mayor intensidad, existiendo un alto nivel de probabilidad de que se repita en un futuro. De igual manera, los continuos cambios climáticos permiten deducir que se generaran con mayor frecuencia.

Los aludes torrenciales no pueden evitarse, sin embargo es posible la realización de estudios que permitan prevenir las pérdidas humanas y materiales que se producen como consecuencia de los mismos.

Los estudios referidos a los flujos naturales de estas características son de considerable complejidad y costo, los mismos representan un fenómeno no permanente cuyas propiedades van cambiando en su movimiento. Está constituido por una mezcla de lodo, sedimentos, agua, entre otros elementos, que hacen necesaria su diferenciación de los flujos convencionales. En el estudio de aludes torrenciales, el fluido debe simplificarse con la intención de tener una mejor aproximación de su comportamiento real, necesitando equipos especiales de difícil manejo y alto costo en el mercado. Estas limitaciones han afectado notablemente el avance en las investigaciones correspondientes a este tema, confinándolo a aquellas instituciones y laboratorios que cuenten con recursos financieros necesarios para la realización de los trabajos científicos.

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar la factibilidad del estudio de flujos hiperconcentrados (muestras simplificadas de aludes torrenciales) en un instrumento de fácil manejo y bajo costo denominado reómetro de bola rodante. Las dimensiones y el peso de este equipo le hacen fácilmente transportable y muy versátil al momento de realizar pruebas en campo, por lo que representaría un importante aporte en el estudio de estos fenómenos.

1.5 ALCANCES

El presente trabajo de investigación intenta comprobar la factibilidad de uso del reómetro de bola rodante en el análisis de flujos hiperconcentrados. Esta investigación realizará aportes metodológicos referidos a la realización de ensayos de relativa sencillez utilizando el instrumento en cuestión. Es fundamental resaltar que, la construcción del dispositivo no representa, en sí mismo, el objeto final del trabajo, siendo esto simplemente un medio para concretar los objetivos.

Este trabajo busca suministrar información (caracterización reológica de flujos hiperconcentrados), a futuras investigaciones que planteen la elaboración de medidas de prevención y riesgo no estructurales, lo cual permitiría disminuir las pérdidas humanas y materiales asociadas al fenómeno de los aludes torrenciales.

En el estudio reológico de los aludes torrenciales existen ciertas limitaciones que conducen a una simplificación del fenómeno, el cual por su composición (barro, sedimentos, agua y otros elementos) resulta muy difícil de ensayar. En este trabajo de investigación, mediante un modelo físico reducido se intenta hacer una aproximación lo más cercana a la realidad posible. Al respecto, es importante precisar que se ensayaran muestras de una matriz granular fina (mezcla de agua y sedimentos finos), ya que son sus propiedades y volumen los que gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de sedimentos (García, 2008). Dicha matriz constituye la parte más viscosa del fenómeno, capaz de transportar piedras y otros materiales de gran tamaño. (Navarro, 2006). Por su parte, Coussot, Laigle, Arattano, Deganutti y Marchi (1998) validaron la utilización de esta matriz, proponiendo además un método para extrapolar los resultados de los ensayos y, de esta forma, inferir el comportamiento de la mezcla global.

Sin embargo, es importante tener en cuenta posturas como las de Blanco, Rodríguez y García (2009) quienes afirman que “extrapolar resultados a partir de experimentos de laboratorio a escala real puede conducir a predicciones no precisas”. Por lo tanto, es fundamental resaltar que, aunque este trabajo busca realizar aportes experimentales al estudio de aludes torrenciales, los resultados que se obtendrán no deben considerarse reflejo exacto del fenómeno.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Al definir un fenómeno natural se hace referencia a cualquier manifestación de la naturaleza, es decir, cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno, ya sea de cierta regularidad o de aparición extraordinaria y sorprendente. Dichos fenómenos pueden o no ser previsibles, según el conocimiento que se tenga del mismo. Así, un fenómeno natural no provoca necesariamente un desastre natural, lo hace cuando los cambios que se generan en la tierra afectan el modo de vida de los seres humanos. Es fundamental entender que, el planeta aún se encuentra en su fase de formación y es normal que, debido a su funcionamiento, se presenten cambios en su faz exterior (Maskrey, 1993).

En la ocurrencia de un desastre natural intervienen dos variables fundamentales: riesgo y vulnerabilidad (Maskrey, 1993). En este sentido, Maskrey (1993) propone la Expresión (2.1), que se muestra a continuación:

$$\text{Desastre} = \text{riesgo} \times \text{vulnerabilidad} \quad (2.1)$$

En la cual el riesgo se refiere a cualquier fenómeno natural capaz de producir un cambio físico en determinada región o comunidad (en nuestro caso es correspondiente a los aludes torrenciales), mientras que, la vulnerabilidad se refiere a la incapacidad de dicha comunidad (económica, científica y técnica) de soportar los efectos de dicho fenómeno.

El presente capítulo tiene la finalidad de explicar los elementos teóricos, tanto referentes al fenómeno de los aludes torrenciales como a las técnicas

científicas utilizadas para su estudio, haciendo énfasis en el reómetro de bola rodante como instrumento alternativo para la caracterización de estos flujos.

2.1 FLUJOS COMO MOVIMIENTOS DE MASA

Según Corominas (1998) los movimientos de masas son “procesos de la geodinámica externa que modifican las diferentes formas del terreno”. Dichos movimientos involucran materiales que componen las laderas bajo la influencia de la gravedad.

Los flujos son movimientos de masa sobre una superficie de falla, en los cuales existen deslizamientos relativos de partículas o bloques pequeños (véase *Figura 2.1*). A medida que desciende, la masa no conserva su forma debido a la deformación interna y continua del material. Pueden estar compuestos de diferentes elementos (roca, barro, residuos, entre otros), ocurriendo generalmente por la saturación de los materiales superficiales. En ellos, no existe una superficie definida de desplazamiento y pueden alcanzar diferentes velocidades.

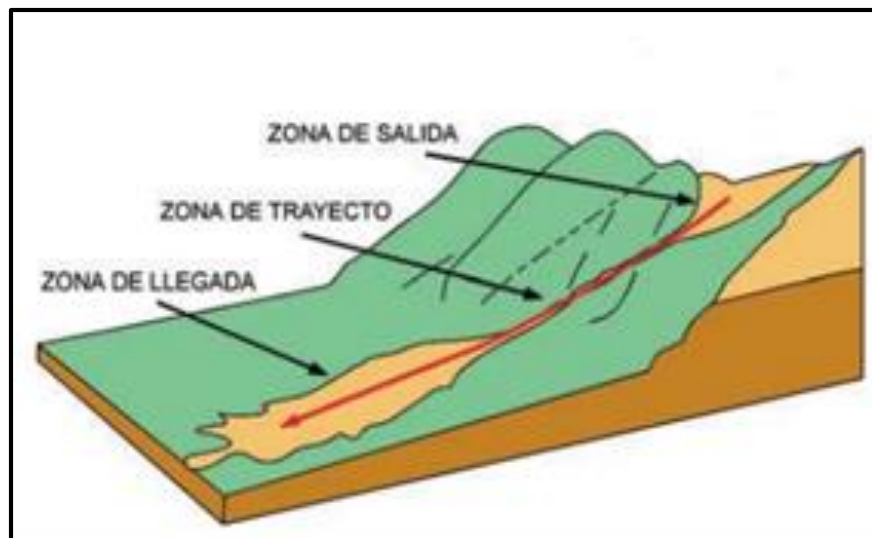


Figura 2. 1. Esquema de un flujo
Fuente: Copons, R. y Tallada, A. (2009).

2.2 ALUDES TORRENCIALES

Los aludes torrenciales son flujos con altas concentraciones de sedimentos (hiperconcentraciones) que se generan en las cuencas montañosas (véase *Figura 2.2*), cuyo origen está asociado a la ocurrencia de deslizamientos durante lluvias prolongadas y de alta intensidad, que pueden estar conformados por agua, barro, rocas y grandes restos de vegetación, así como por todo tipo de desperdicios y arrastres de materiales fabricados por el hombre (López, 2006).

Teóricamente, pueden definirse como una masa de sedimento poco seleccionado, en agitación y saturado de agua, que progresa rápidamente pendiente abajo a consecuencia de la gravedad; la masa -finita- de sedimento saturado mantiene una superficie libre. Estos se diferencian de las avalanchas de rocas y de las corrientes de agua en el hecho de que en ellos, tanto las fuerzas “sólidas” como las fuerzas “fluidas”, intervienen en el movimiento. Mientras que las fuerzas sólidas dominan la física de las avalanchas de roca y las fuerzas fluidas dominan la física de las corrientes de agua, ambos tipos de fuerzas deben interactuar para producir un alud torrencial (Iverson, 1997), esto les da un gran poder destructivo.



Figura 2. 2. Alud torrencial ocurrido en Vargas en diciembre de 1999.

Fuente: Plan de Ordenación Urbanística del estado Vargas, 2006.

<http://dc388.4shared.com/doc/kVTTgWu9/preview.html>

Este tipo de fenómenos posee una granulometría extendida (no uniforme), con una cierta clasificación de los granos en su interior. En el mismo, se pueden diferenciar básicamente 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 (véase *Figura 2.3*).

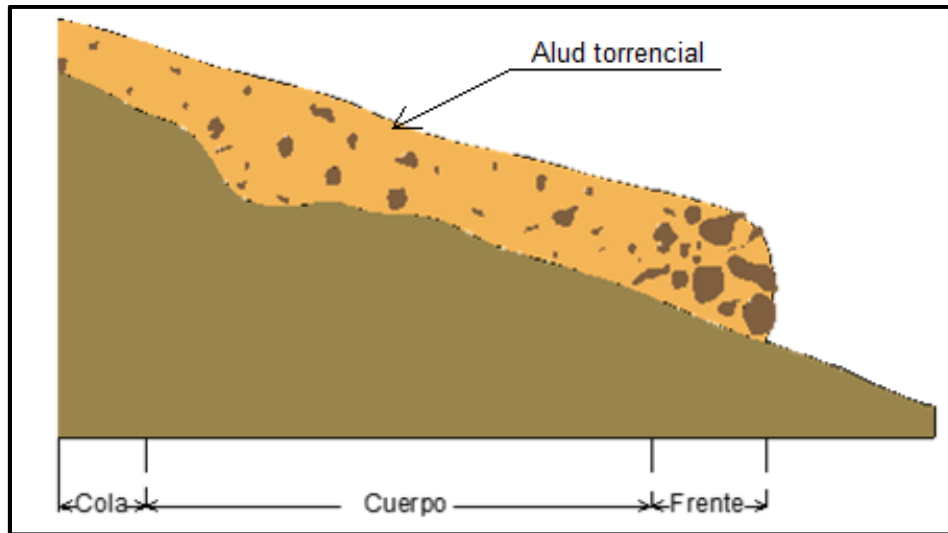


Figura 2. 3. Partes de un flujo típico de detritos
Fuente: Adaptado de López (2006).

Estos flujos suelen presentarse en los cañones y los cauces fluviales de las regiones de alta montaña (Castillo, 2006). Igualmente, en la morfología de una zona que haya sufrido un deslizamiento de tierra, se pueden definir tres partes: embudo o zona de iniciación, zona de transición o zona de tránsito y la zona de depósito (véase *Figura 2.4*).

La zona de iniciación acostumbra ser escarpada y poco vegetada, en ella abundan los suelos detríticos o existe un suelo de meteorización del sustrato. La pendiente de esta zona es siempre elevada y varía generalmente entre los 25 ° y los 40°.

El canal o zona de transición, es un surco erosivo que está limitado generalmente por diques laterales. La velocidad de los aludes torrenciales abarca un amplio rango de valores, desde los 0,5 m/s a los 20 m/s, en función del material que forma la corriente (granulometría, concentración de sólidos y clasificación de los granos) y de las características de la zona de propagación (topografía, confinamiento, rugosidad), entre otros factores.

En la zona de acumulación es donde se deposita el material del alud. Aquí el flujo deja de estar confinado en un canal y desaparecen los diques laterales. En muchas ocasiones, el paso a unas condiciones no confinadas coincide con una disminución más o menos brusca de la pendiente. Cuando la velocidad es suficientemente baja el material se desplaza sobre la superficie, recubriéndola y sin erosionar el terreno, hasta que cesa el movimiento.

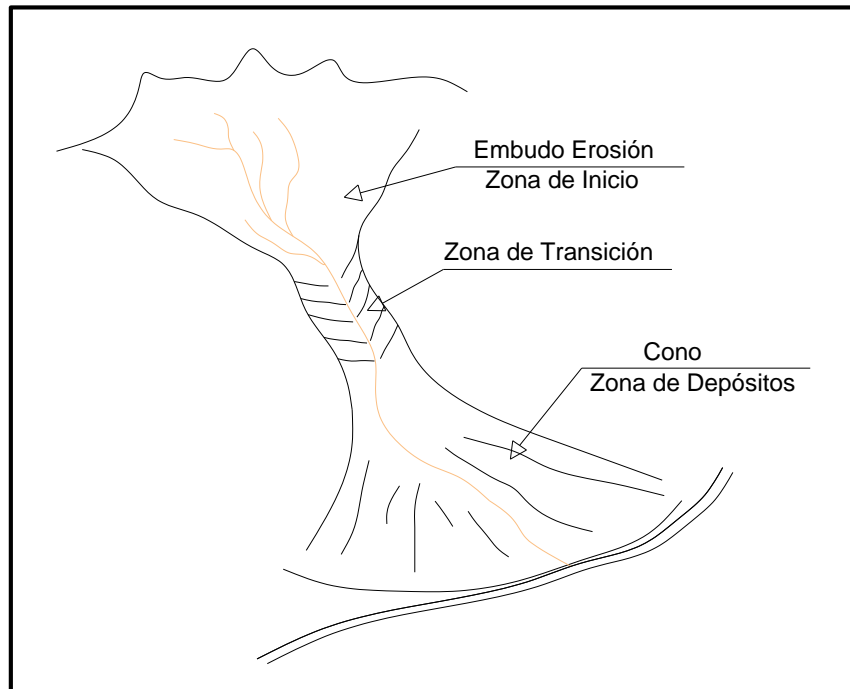


Figura 2. 4. Morfología en planta de una zona que ha sufrido un deslizamiento de tierra
Fuente: Adaptado de Arveloy Díaz (2009)

El estudio de este tipo de fenómenos presenta varias complicaciones; una de las más resaltantes es que el transporte de sólidos es tan grande que las nociones de Hidráulica Fluvial no pueden ser tomadas en cuenta por si solas. La fase sólida tiene gran influencia en el movimiento del fluido y por ende no puede separarse el flujo de agua, con sus ecuaciones de movimiento por un lado, y el transporte de material sólido por otro.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS ALUDES TORRENCIALES

Existen varios tipos de fenómenos naturales que ocurren en zonas montañosas y que implican el movimiento de grandes masas de sedimentos y agua; esto hace que clasificar estos fenómenos se convierta en una tarea compleja. Es muy común encontrar en la literatura nombres como: inundaciones, transporte sólido, flujos hiperconcentrados, flujos de lodo, flujos de escombros (debris flow), flujos granulares, deslizamientos de tierra, entre otros. Además, el criterio usado para distinguir el fenómeno puede variar de un autor a otro: características de la cuenca, la composición de los sedimentos, la fracción sólida, la velocidad, la duración, la pendiente del lecho, el comportamiento del material, los procesos físicos durante el flujo, entre otros.

En base a lo anterior, las diferentes clasificaciones pueden contradecirse unas con otras cuando están basadas solo en criterios cuantitativos como la velocidad, la fracción sólida, entre otros, o pueden ser incompatibles para describir todo el fenómeno. Cuando están basadas en el análisis de la microestructura del material o en otros parámetros relativos a las características del flujo, la clasificación es difícil de utilizar en la práctica, debido a que las observaciones que se pueden llevar a cabo después del evento, no proporcionan la información necesaria. De igual manera, es dudoso que las características mecánicas, tales como la velocidad, la profundidad o anchura de flujo, sean parámetros relevantes para la clasificación ya que dependen de los límites y las

condiciones iniciales y por lo tanto pueden variar fácilmente de un evento a otro o en el mismo evento (Coussot y Meunier, 1996).

A continuación, se presentarán una serie de clasificaciones que, en general, son las más usadas por los investigadores de esta área:

2.3.1 Pierson y Costa (1987)

Estos investigadores emplearon tanto términos reológicos como geomorfológicos para describir los aludes torrenciales (*véase Figura 2.5*). En su clasificación consideran la concentración volumétrica de los sedimentos, la velocidad media, el componente preponderante (agua, aire o sólidos) y las fuerzas dominantes (fuerzas viscosas, fuerzas inerciales, entre otros).

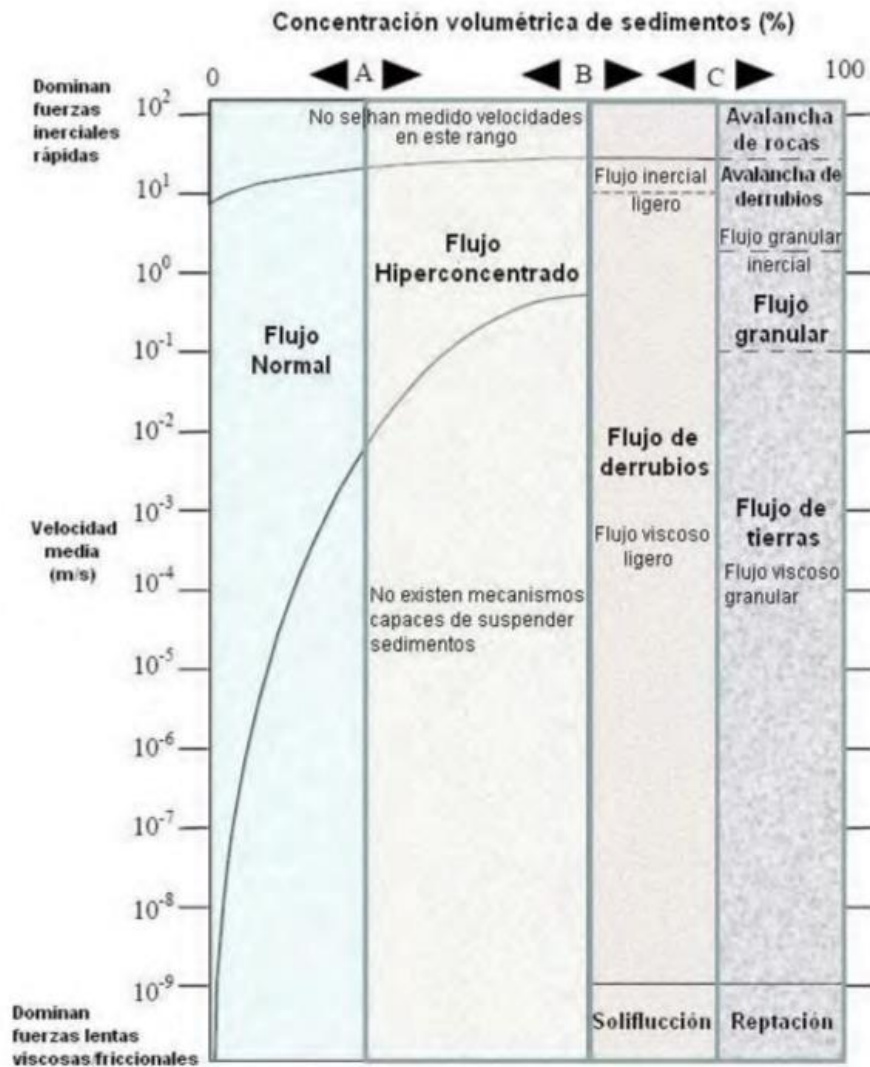


Figura 2. 5. Clasificación de flujos en función de la Concentración Volumétrica y la Velocidad Media del Flujo

Fuente: Pierson y Costa (1987).

2.3.2 Costa (1988)

Costa realiza una clasificación que divide a los flujos en tres categorías: Avenida de Agua, Flujo Hiperconcentrados y Flujo de Escombros (véase Tablas 2.1 y 2.2). La ventaja de esta clasificación consiste en diferenciar los flujos dependiendo de sus concentraciones, tanto en peso como en volumen. Además,

se toma en cuenta el comportamiento reológico del flujo. Las fuerzas internas, la granulometría, la densidad de los sólidos presentes y el comportamiento laminar o turbulento también son considerados.

Tabla 2. 1. Clasificación de los flujos según la concentración de sedimentos

CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS				
FLUJO	CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS	DENSIDAD DE LOS SÓLIDOS (g/cm³)	τ_y (dn/cm²)	TIPO DE FLUIDO
Avenida de Agua	1 - 40% en peso 0.4 - 20% en volumen	1.01 - 1.33	0 - 100	Newtoniano
Flujo Hiperconcentrado	40 - 70% en peso 20 - 47% en volumen	1.33 - 1.80	100 - 400	No-Newtoniano
Flujo de Escombros	70 - 90% en peso 47 - 77% en volumen	1.80 - 2.30	> 400	No-Newtoniano

Fuente: Adaptado de Costa (1988).

Tabla 2. 2. Clasificación de los flujos según el mecanismo de soporte de sedimentos

CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS				
FLUJO	MECANISMO DE SOPORTE DE LOS SEDIMENTOS	VISCOSIDAD (POISE)	PERFIL DE CONCENTRACIÓN DE LOS SEDIMENTOS	FLUJO PREDOMINANTE
Avenida de Agua	Fuerzas electroestáticas, turbulencia	0.01 - 20	No uniforme	Turbulento
Flujo Hiperconcentrados	Empuje, esfuerzo dispersivo, turbulencia	20 - 200	No uniforme a Uniforme	Turbulento a Laminar
Flujo de Escombros	Cohesión, empuje, esfuerzo dispersivo, soporte estructural	>> 200	Uniforme	Laminar

Fuente: Adaptado de Costa (1988).

2.3.3 Coussot (1992)

Este investigador clasifica los aludes torrenciales dependiendo de la concentración volumétrica de los sedimentos y del contenido de material fino. Dicha clasificación distingue a los flujos hiperconcentrados de otros tipos de flujos naturales como los flujos detríticos, las avalanchas y derrumbes (véase Figura 2.6).

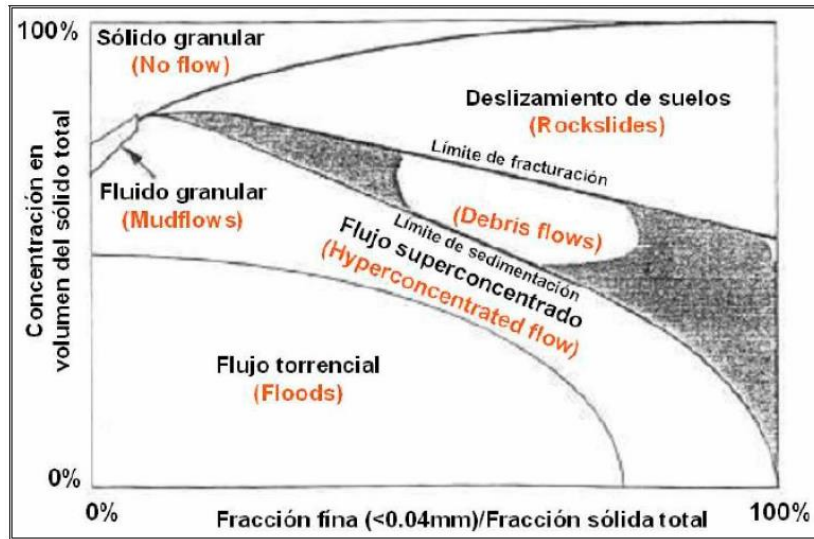


Figura 2. 6. Clasificación de los flujos según la concentración volumétrica y contenido de material fino

Fuente: Coussot (1992).

2.3.4 Coussot y Meunier (1996)

Estos investigadores realizaron una sencilla clasificación que propone una forma cualitativa, rápida e intuitiva de definir el flujo. Sin embargo, afirman que “una distinción general y estricta de estos fenómenos siguiendo estos criterios es imposible” (Coussot y Meunier, 1996).

La clasificación de los fenómenos se basa en una apreciación de la composición del flujo, observando dos criterios: la fracción sólida y el tipo de material presente. Así, realizaron un sencillo esquema en forma elíptica, en el

que dependiendo de la cantidad de agua o solido que se encuentre en el fenómeno, se puede definir el tipo de flujo (véase Figura 2.7).

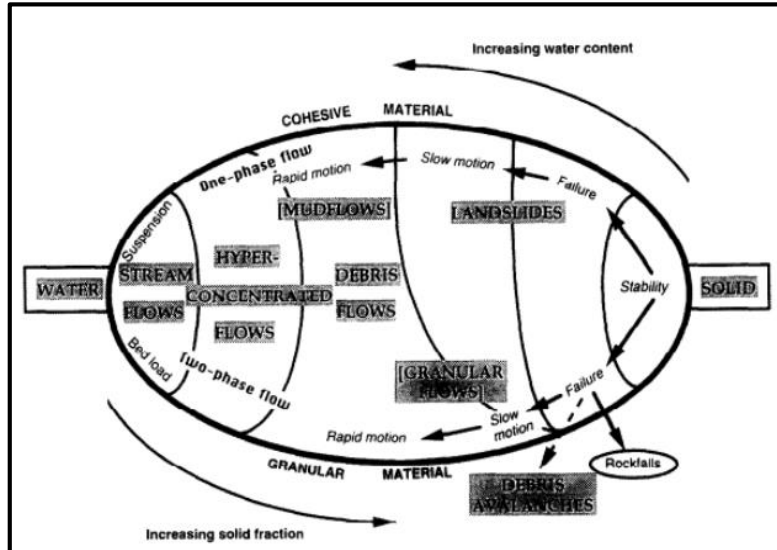


Figura 2. 7. Clasificación de los flujos como función de la fracción sólida y el tipo de material
Fuente: Coussot y Meunier (1996).

2.3.5 O'Brien y Julien (1988)

Estos investigadores definen 4 tipos de flujos: Deslizamiento, flujo de lodos, crecida de lodos y crecida de agua. Para ello, establecen unos intervalos de concentración de sedimentos tanto en volumen como en peso. Adicionalmente, proporcionan una descripción de las características generales en cuanto al comportamiento del flujo (véase Tabla 2.3).

Tabla 2. 3. Clasificación de los Flujos Hiperconcentrados según O'Brien y Julien

CLASIFICACIÓN DE FLUJOS HIPERCONCENTRADOS			
TIPO DE FLUJO	CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS		CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO
	EN VOLUMEN	EN PESO	
DESLIZAMIENTO	0,65-0,80	0,83-0,91	No fluye, falla por deslizamiento de bloques
	0,55-0,65	0,76-0,83	Falla por deslizamiento de bloques con deformación interna durante el deslizamiento; repteo lento antes de la falla.
FLUJO DE LODOS	0,48-0,55	0,72-0,76	Flujo evidente; flujo de lodos lento con repteo sostenido; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo, no se esparce en superficie llana.
	0,45-0,48	0,69-0,72	Flujo que se esparce en superficie llana; flujo cohesivo; algo de mezcla. Flujo que se mezcla fácilmente; en la deformación muestra características de un fluido; se extiende en superficie horizontal pero la superficie del fluido mantiene cierta inclinación; asentamiento de partículas grandes (canto rodado); con aparición de ondas que se disipan rápidamente.
CRECIDA DE LODO	0,40-0,45	0,65-0,69	Markado asentamiento de gravas, desparrame casi total en superficie horizontal; aparecen dos fases fluidas en la superficie líquida; las ondas viajan en superficie.
	0,35-0,40	0,59-0,65	Separación del agua en superficie; las ondas viajan fácilmente; la mayoría de la grava y la arena ha asentado y se mueve como carga de fondo.
	0,30-0,35	0,54-0,59	Acción distinta de la onda; superficie fluida; todas las partículas descansan sobre el lecho en condiciones estáticas del fluido
	0,20-0,30	0,41	Crecida de agua convencional con carga en suspensión y arrastre de fondo.
CRECIDA DE AGUA	<0,20	<0,41	

Fuente: Adaptado de O'Brien y Julien (1988).

2.3.6 Hungr, Evans, Boris y Hutchinson (2001)

Hungr y otros, proponen un sistema que establece diferencias entre los materiales de los deslizamientos, basándose en aspectos morfológicos. Así, plantean diez (10) clases diferentes de deslizamientos en forma de flujos, poniendo especial atención en los materiales que lo componen. Asimismo, establecen características como: velocidad, condiciones especiales, entre otros

(véase Tabla 2.4). Es importante destacar que la velocidad a la que se hace referencia en la Tabla 2.4, se basa en la escala propuesta por Cruden y Varnes (1996), que se puede observar en la Tabla 2.5.

Tabla 2. 4. Clasificación de deslizamientos en forma de flujo según Hungr y otros

CLASIFICACIÓN DE DESLIZAMIENTOS EN FORMA DE FLUJO					
MATERIAL	CONTENIDO DE	CONDICIÓN ESPECIAL	VELOCIDAD*	DENOMINACIÓN	DESIGNACIÓN EN INGLÉS
Limo, arena, grava, derrubios	Seco, húmedo o saturado	- No hay exceso de presión intersticial - Volumen limitado	Varias	Flujo de arenas (limo, grava, derrubios) no licuables	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Limo, arena, derrubios, roca débil	Saturado en la superficie de rotura	- Material licuable - Contenido de humedad constante	Extremadamente rápida	Flujo deslizando o fluidización de arenas (limo, derrubios, rocas)	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Arcilla sensitiva	En o por encima del límite líquido	- Licuefacción in situ - Contenido de humedad constante	Extremadamente rápida	Flujo deslizando o fluidización de arcillas	Clay flow slide
Turba	Saturado	- Exceso de presión intersticial	Lenta a muy rápida	Flujo de turbas	Peat flow
Arcilla o tierra	Cercano al límite plástico	- Movimiento lento - Flujo rígido sin deformación cortante	Menor que rápida	Flujo (alud) de tierra	Earth flow
Derrubios	Saturado	- Canal	Extremadamente rápida	Flujo de derrubios	Debris flow
Lodo	En o por encima del límite líquido	- Flujo de derrubios de grano fino	Mayor que muy rápida	Flujo (alud) de lodo	Mud flow
Derrubios	Presencia de agua libre	- Avenida (crecida)	Extremadamente rápida	Torrente (crecida) de derrubios	Debris flood
Derrubios	Parcial o totalmente saturado	- Canal no consolidado - Relativamente superficial, origen con fuerte pendiente	Extremadamente rápida	Avalancha de derrubios	Debris avalanche
Roca fragmentada	Varios, principalmente seco	- Roca intacta en el origen	Extremadamente rápida	Avalancha de rocas	Rock avalanche

Fuente: Adaptado de Hungr et al (2001)

Tabla 2. 5. Escala de velocidades de deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes

ESCALA DE VELOCIDADES DE DESLIZAMIENTOS			
CLASE	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (m/s)	VELOCIDAD TÍPICA
7	Extremadamente rápida	$> 5 \times 10^3$	> 5 m/s
6	Muy rápida	Entre $5 * 10^3$ y $5 * 10^1$	Entre 5 m/s y 0,05 m/s
5	Rápida	Entre $5 * 10^1$ y $5 * 10^{-1}$	Entre 0,05 m/s y 1,8 m/h
4	Moderada	Entre $5 * 10^{-1}$ y $5 * 10^{-3}$	Entre 1,8 m/h y 13 m/ mes
3	Lenta	Entre $5 * 10^{-3}$ y $5 * 10^{-5}$	Entre 13 m/mes y 1,6 m/año
2	Muy lenta	Entre $5 * 10^{-5}$ y $5 * 10^{-7}$	Entre 1,6 m/año y 16 mm/año
1	Extremadamente lenta	$< 5 * 10^{-7}$	< 16 mm/ año

Fuente: Adaptado de Cruden y Varnes (1996).

2.4 MECANISMOS DE SOPORTE DE PARTÍCULAS

Los aludes torrenciales tienen la potencialidad de mover grandes cantidades de sedimentos y rocas de gran tamaño a lo largo de distancias considerables. Los investigadores Rodine y Johnson (1976) han documentado la presencia en estos fenómenos de rocas con tamaños que van de 1 m a 5 m. Esta capacidad de transporte ha despertado el interés científico de diversos investigadores, ya que dichas rocas parecen “flotar” durante el desarrollo del fenómeno (Costa, 1984). Estos materiales tienden a hundirse por el efecto de la gravedad pero son siempre soportados por una matriz granular fina compuesta por arcillas y limos. Para explicar el hecho de que grandes materiales sólidos puedan ser trasladados y soportados durante un alud torrencial, se han sugerido cuatro mecanismos: Cohesión, Flotabilidad, Presiones Dispersivas y Turbulencia.

2.4.1 Cohesión

La resistencia cohesiva, la cual se entiende como la tendencia a aproximarse de dos planos de átomos en equilibrio en una suspensión de agua y arcilla, ha sido sugerida según Costa (1984), como el mayor mecanismo de soporte. Rodine y Johnson (1976), realizaron varios experimentos utilizando caolín y pequeñas esferas de vidrio, llegando a la conclusión de que la fracción de arcilla (caolín) presente en la mezcla juega un rol crítico en el comportamiento del alud torrencial (debris flow). La mezcla de arcilla y agua crea una suspensión sobre la que se apoyan los escombros, reduciendo también los esfuerzos normales efectivos entre las partículas (Rodine y Johnson, 1976).

2.4.2 Flotabilidad

La flotabilidad en conjunto con la resistencia cohesiva, es considerada por la mayoría de los investigadores como uno de los mecanismos de soporte de partículas más importantes. La flotabilidad es determinada por la diferencia de densidades entre el sólido sumergido y el fluido, entre la densidad del sólido sumergido, tal como se muestra en la Expresión (2.2):

$$\frac{\rho_{sólido} - \rho_{fluido}}{\rho_{sólido}} \quad (2.2)$$

Autores como Rodine J. y Johnson A. (1976) consideran que la fuerza de flotabilidad que actúa sobre la roca es igual al peso de todo el material desplazado (tanto sólido como fluido, no solo la mezcla de agua y arcilla) (Pierson, 1981). La flotabilidad puede soportar, según Costa (1984) cerca del 75 – 90% del peso de las partículas de un alud torrencial.

2.4.3 Presiones dispersivas

Bagnold (1954) fue el primero en demostrar experimentalmente la existencia de este mecanismo de soporte. Dicho investigador señaló que cuando existe una alta concentración de granos de diferentes tamaños en el flujo, las partículas más grandes tienden a irse hacia la superficie libre. Este ascenso es resultado de las fuerzas que se transmiten entre las partículas en colisión o cercanas a la colisión como si estuviera cizallándose una sobre la otra (Costa, 1984).

La presión dispersiva, a su vez, es la responsable de la migración de las grandes partículas hacia los márgenes de la corriente

Bagnold fórmula una Ecuación (2.3) para estas presiones dispersivas:

$$P = 0.0042 \cdot \lambda \cdot D_p^2 \left(\frac{dv}{dy} \right) \cos \theta \quad (2.3)$$

Donde:

P= Presión Dispersiva

λ = Concentración lineal de granos

$\left(\frac{dv}{dy} \right)$ = Gradiente de Velocidad

θ = Angulo dinámico de fricción interna

D_p = Diámetro de la partícula

2.4.4 Turbulencia

La turbulencia como un mecanismo de soporte es cuestionable ya que la presencia de grandes rocas, bloques y distintos tipos de materiales sólidos

suspendidos en el flujo, señala la fuerte existencia de un flujo laminar. Aun así, Lawson (1982) y Vanoni (2006) señalan la importancia de la turbulencia en el arrastre de sedimentos, teniendo esta un rol más activo en la medida que aumenta la cantidad de agua contenida en el fenómeno.

2.5 REOLOGÍA DE SUSPENSIONES CONCENTRADAS

El estudio del comportamiento reológico de las suspensiones forma parte del extenso campo que abarca la fisicoquímica de dispersiones. En este orden de ideas, una dispersión puede definirse como una mezcla de dos fases distintas, una de ellas denominada fase fluida o dispersante (fluido continuo) y otra fase dispersa, la cual es discontinua y se ordena bajo la forma de elementos separados de volumen. De esta forma, cuando la mezcla se trata de partículas sólidas diluidas en un líquido se hace referencia a una suspensión. (Fuentes, 2008).

En la naturaleza es común encontrar diferentes tipos de suspensiones, entre ellas podemos mencionar: magmas, lavas, avalanchas de nieve, escurrimiento de glaciares, aludes torrenciales, entre otros. Lo anterior permite entender la importancia del estudio reológico de suspensiones en el presente trabajo.

Las propiedades de la suspensión inciden junto a otras variables en los parámetros de los diferentes modelos reológicos (Coussot, 1997). En este sentido, es importante precisar los efectos de la concentración, la distribución de tamaños de partículas y el pH y cambios electrolíticos de la suspensión.

2.5.1 Efectos de la concentración

Según Fuentes (2008) a medida que se aumenta la concentración de sólidos crece la viscosidad. De esta forma, si se trabaja con concentraciones

pequeñas la viscosidad aumenta ligeramente, mientras que, a valores elevados de concentración la viscosidad crece abruptamente. Por su parte, Coussot (2007) señala que a bajas tasas de deformación y altas concentraciones la suspensión se comporta como un fluido tipo plástico, mientras que con altas tasas de deformación y bajas concentraciones la curva de flujo presenta un comportamiento newtoniano.

2.5.2 Efectos de la distribución de tamaños de partículas

López y Miranda (2009) explican que la viscosidad de una suspensión con amplios rangos de distribución de partículas puede ser menor que aquellas de rangos minúsculos. Lo anterior se debe a que las partículas más pequeñas ocupan los intersticios de las más grandes, disminuyendo las interacciones y por lo tanto la resistencia a fluir. Algunos autores como Coussot (1997) no le dan relevancia a este parámetro.

2.5.3 Efectos del pH y cambios electrolíticos

Los investigadores Coussot y Piau (1995); Alves, Barbato, Pinto y Nele (2008), han enfatizado la influencia significativa del pH y los cambios electrolíticos en la reología de suspensiones. Lo anterior exige prestar especial atención a la naturaleza de las muestras a ensayar. Los investigadores Nuntiya y Prasanpham (2006) realizaron estudios de suspensiones de caolín, demostrando que la alta viscosidad de las muestras estudiadas era consecuencia de la interacción electrostática entre partículas debido a la coexistencia de bordes con cargas positivas y superficies basales con carga negativa. El aumento del pH provoca el debilitamiento de las atracciones inter partícula a través de una neutralización de las cargas positivas, produciendo una repulsión de las cargas similarmente negativas, traduciéndose todo esto en una disminución de la viscosidad plástica del sistema (Coussot, 1997).

2.6 EXPERIMENTACIÓN EN LA REOLOGÍA DE ALUDES TORRENCIALES

Para la caracterización reológica de las muestras relacionadas a los aludes torrenciales, los investigadores han realizado diferentes tipos de ensayos, tanto convencionales como no convencionales, con la intención de aproximarse con efectividad al comportamiento real del fenómeno. Sin embargo, los equipos han presentado las dificultades que se mencionan a continuación:

1. Sedimentación de la mezcla utilizada, formándose franjas con diferentes concentraciones.
2. Deslizamiento de la mezcla en las paredes de los cilindros lisos.
3. Penetración de partículas finas en algunas partes del equipo.

A continuación se detallan los componentes, funcionamiento y las ecuaciones que rigen a los dispositivos comúnmente utilizados para la caracterización reológica de flujos hiperconcentrados.

2.6.1 Reómetros rotacionales

De acuerdo a Chhabra y Richardson (1999), este tipo de instrumento está conformado por dos partes (una que gira y otra que se mantiene fija), entre las cuales se encuentra el fluido a estudiar. La resistencia a la torsión del fluido ante el movimiento de una de las partes permite determinar su viscosidad.

Existen varios tipos de reómetros convencionales según la geometría de sus partes. Entre ellos están: el reómetro de cilindros concéntricos, el reómetro de placas paralelas y el reómetro de cono-placa (Chhabra y Richardson, 1999).

2.6.1.1 Reómetro de cilindros concéntricos

Estos reómetros se basan en el análisis del fluido en el espacio anular de dos cilindros concéntricos (el cilindro exterior es hueco mientras que el cilindro interior es macizo). Las medidas se pueden obtener de dos formas: a) Girando el elemento móvil con cierto par y calculando la velocidad; b) Provocando cierta velocidad y calculando el par (véase Figura 2.8).

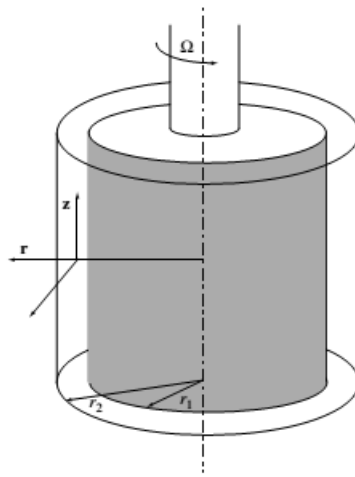


Figura 2. 8. Reómetro de cilindros concéntricos
Fuente: Chhabra y Richardson, 1999.

Una vez determinado el par, el esfuerzo de corte puede expresarse mediante las Ecuaciones (2.4) y (2.5) (dependiendo del cilindro móvil, interno o externo respectivamente):

$$\tau (R_i) = \frac{M_i}{2 \pi R_i^2 H} \quad (2.4)$$

o

$$\tau (R_o) = \frac{M_i}{2 \pi R_o^2 H} \quad (2.5)$$

Donde:

M = Par de fuerzas

H = Altura del cilindro interno

Por su parte, el esfuerzo de deformación se calcula con la Expresión (2.6):

$$\dot{\gamma}(R_i) \cong \dot{\gamma}(R_o) = \Omega \frac{\bar{R}}{R_o - R_i} \quad (2.6)$$

El valor de \bar{R} está dado en la Expresión (2.7):

$$\bar{R} = \frac{(R_o + R_i)}{2} \quad (2.7)$$

Donde:

Ω = Velocidad angular

2.6.1.2 Reómetro de placas paralelas

Este instrumento está conformado por dos placas, una de las cuales se mantiene fija y otra que se mueve. La velocidad del fluido será superior al aproximarse a la placa móvil. Una de sus ventajas es poder fijar el espesor de la muestra según las características de la misma. Por otro lado, la velocidad de corte varía de acuerdo a la distancia al centro de la placa, representando esto una desventaja para la medición de la muestra (*véase Figura 2.9*).

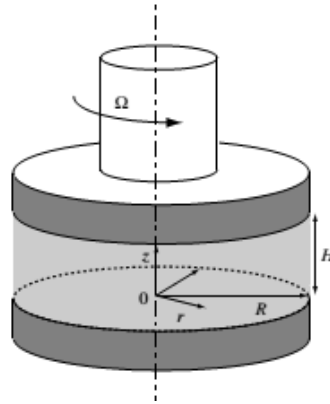


Figura 2. 9. Reómetro de placas paralelas
Fuente: Chhabra y Richardson, 1999.

La velocidad de deformación puede determinarse a través la Expresión (2.8):

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \Omega \cdot \frac{R}{H} \quad (2.8)$$

Donde:

R = Radio del plato

H= Distancia entre los planos

Por su parte, la viscosidad aparente viene dada por la Ecuación (2.9):

$$\eta = \frac{3 M}{2 \pi R^3 (\dot{\gamma}_m)} \left[1 + 3 \frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}_m} \right] \quad (2.9)$$

2.6.1.3 Reómetro de cono-placa

El fluido se encuentra situado en el espacio existente entre un cono y una placa. El ángulo entre ambos debe ser muy pequeño (inferior a 4°) para no complicar los cálculos. En el sistema cono-placa la velocidad de deformación

del fluido es casi completamente constante, ya que la distancia entre las partes es mayor a medida que se aleja del centro (véase Figura 2.10).

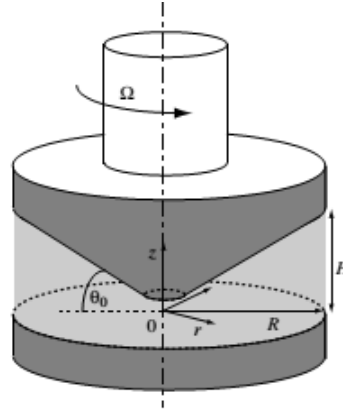


Figura 2. 10. Reómetro de cono-placa
Fuente: Chhabra y Richardson, 1999.

Al asumirse la placa fija, el esfuerzo cortante puede expresarse mediante la Expresión (2.10)

$$\tau = \frac{3 M}{2 \pi R_c^3} \quad (2.10)$$

Donde:

R_c = Radio del cono

Asimismo, la velocidad de deformación viene dada por la Ecuación (2.11):

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\theta_0} \quad (2.11)$$

2.6.2 Reómetro de plano inclinado

Como fue señalado anteriormente, la dificultad en el estudio de muestras de aludes torrenciales propició la aparición de técnicas de reometría no convencional. En este sentido, los investigadores Iverson (1997); Coussot y Ancy (1999); Arvelo y Díaz (2009) se dedicaron a la construcción de canales rectangulares inclinados de distintas magnitudes para predecir el comportamiento de estos flujos (véase *Figura 2.11*).

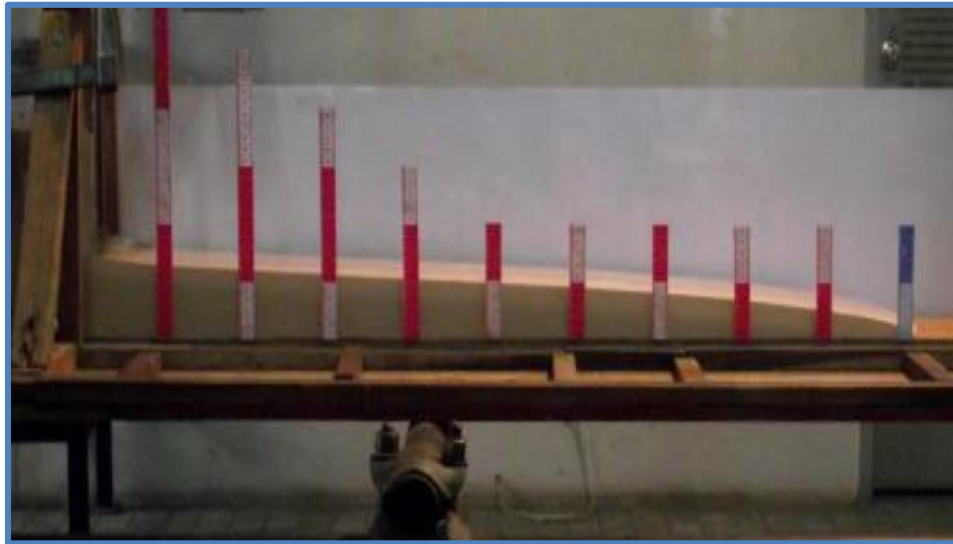


Figura 2. 11. Canal rectangular inclinado para el estudio de flujos no newtonianos
Fuente: Arvelo y Díaz (2009).

En estos canales se registra la profundidad uniforme correspondiente a un caudal determinado o la velocidad superficial libre (Carrasco, 2011).

Sin tomar en cuenta los efectos de contorno y tensión superficial, y considerando un flujo uniforme permanente sobre un canal infinitamente amplio, el caudal por unidad de ancho puede determinarse por la Ecuación (2.12) (Coussot, 1997):

$$q = \int_0^h u(y) \cdot dy = \int_0^h (h-y) \frac{du}{dy} \cdot dy \quad (2.12)$$

Donde:

y = Posición actual perpendicular al fondo del canal

De las ecuaciones de momentum se tiene la Expresión (2.13):

$$\tau = \tau_p \frac{(h-y)}{h} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, la ecuación del caudal se transforma en la Expresión (2.14):

$$q = \int_0^\tau \frac{h^2}{\tau_p^2} \tau \zeta(\tau) d\tau \quad (2.14)$$

Derivando la Ecuación (2.14) y tomando en cuenta la distribución de esfuerzos de un flujo en un plano inclinado infinitamente ancho, se obtiene la Expresión (2.15):

$$\left(\frac{dq}{dh}\right)_i = h \zeta(\tau_p) \quad (2.15)$$

Similarmente, utilizando la velocidad de superficie libre (V_s), se puede deducir la Ecuación (2.16)

$$V_s = \int_0^h \frac{du}{dy} \cdot dy = \int_0^{\tau_p} \frac{h}{\tau_p} \zeta(\tau) d\tau \quad (2.16)$$

De donde $\left(\frac{dV_s}{dh}\right)_i$ se expresa en la Relación (2.17):

$$\left(\frac{dV_s}{dh}\right)_i = \zeta(\tau_p) \quad (2.17)$$

La realización de pruebas experimentales en el canal permite determinar la función ζ , la cual representa el comportamiento reológico del flujo.

2.7 REÓMETRO DE BOLA RODANTE

El reómetro de bola rodante “consiste en un tubo inclinado de vidrio o plástico, en el cual se coloca la muestra a evaluar. Seguidamente, se lanza una esfera que rueda a través de la muestra y se mide el tiempo que tarda en caer a lo largo de una longitud determinada; con esto se calcula la velocidad de caída. La velocidad de caída es función del tamaño y densidad de la esfera y de la densidad y viscosidad del fluido” (Zamora y otros 2007). De esta manera, puede determinarse el comportamiento reológico de diferentes tipos de flujos calibrando el instrumento a partir de datos obtenidos con otros reómetros o a través de fluidos de viscosidades conocidas (*véase Figura 2.12*).

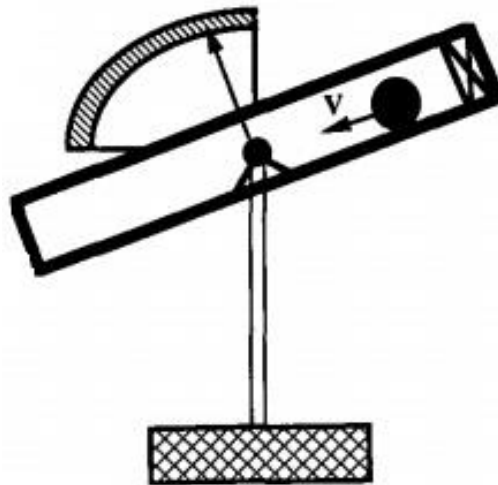


Figura 2. 12. Reómetro de bola rodante
Fuente: Briscoe, Luckham y Ren (1991).

2.7.1 Principios y leyes fundamentales

2.7.1.1 Principio de Arquímedes

El principio de Arquímedes, denominado así en honor al matemático griego Arquímedes (287-212 a.C.) señala que: “Un objeto que se encuentra parcial o totalmente sumergido en un fluido experimenta una fuerza de empuje ascendente igual al peso del fluido desalojado”.

De tal manera, el empuje es el resultado del producto de la densidad del fluido por el volumen del cuerpo sumergido, y la aceleración de gravedad, resultando de la siguiente forma (Ecuación 2.18):

$$E = \rho_f V_C g \quad (2.18)$$

En el caso de una esfera, se expresa como se muestra en la Ecuación 2.19:

$$E = \rho_f \frac{4}{3} \pi R^3 g \quad (2.19)$$

2.7.1.2 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre corresponde a la fuerza que se opone al movimiento de un cuerpo en un fluido. Dicha fuerza es producto de los esfuerzos tangenciales y normales que el fluido ejerce sobre el cuerpo (Sánchez, 2008). Depende de la densidad del fluido, la velocidad, el tamaño, la forma y orientación del objeto, por lo que resulta complejo su determinación analítica, ante lo cual es necesario trabajar con un parámetro adimensional denominado coeficiente de arrastre. De esta manera, la fuerza de arrastre puede expresarse como señala la Ecuación 2.20:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_f A_c v_c \quad (2.20)$$

2.7.1.3 Ley de Stokes

La ley de Stokes, denominada así en referencia al matemático y físico irlandés George Stokes, señala que a números de Reynolds muy bajos, la fuerza de arrastre que actúa sobre una esfera es proporcional a su diámetro, velocidad y la viscosidad del fluido. (Cengel y Cimbala, 2004). De esta manera, para $Re < 1$ el coeficiente de arrastre puede expresarse de la siguiente manera (Ecuación 2.21):

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (2.21)$$

La expresión correspondiente a la fuerza de arrastre, para este caso, se expresa como se muestra a continuación (Ecuación 2.22):

$$F_d = 3 \pi \mu v_c D \quad (2.22)$$

2.7.2 Expresiones analíticas del reómetro de bola rodante para fluidos newtonianos

En 1914, Flowers fue el primer investigador que formuló una ecuación para determinar la viscosidad de un fluido newtoniano utilizando el reómetro de bola rodante. Dicha Ecuación (2.23), modificada por Hoespler (1933), tiene la siguiente forma:

$$\mu = k(\rho_b - \rho_f)t \quad (2.23)$$

Donde:

μ = viscosidad del flujo

k = constante del instrumento

ρ_b = Densidad de la bola

ρ_f = Densidad del fluido

t = Tiempo que la bola tarda en recorrer una longitud determinada

Flowers calculó la constante K del instrumento a través de la calibración del mismo con un fluido de viscosidad conocida. A su vez, Hubbard y Brown (1943) realizaron un análisis dimensional y propusieron una expresión para determinar analíticamente dicho valor. Sin embargo, dicha expresión fue modificada y mejorada por estudios de Lewis (1953) quien planteó la Expresión (2.24):

$$k = \frac{1}{12\pi J_l} g \sin \beta \frac{D^2}{L} \left(\frac{D-d}{D} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (2.24)$$

Donde:

J_l = es una constante igual a 0,398

β = ángulo de inclinación del instrumento

D = diámetro del tubo

d = diámetro de la bola

L = Longitud del tubo

2.7.3 Expresiones analíticas del reómetro de bola rodante para fluidos no newtonianos

Los investigadores Bird y Turian (1964) generalizaron la ecuación de Lewis (1953) para fluidos no newtonianos, específicamente fluidos de ley de potencia, describiendo la relación esfuerzo-tasa de deformación mediante la Ecuación (2.25):

$$\tau_{rz} = -m \left| \frac{du_z}{dr} \right|^{n-1} \cdot \frac{du_z}{dr} \quad (2.25)$$

Sin embargo, Sestak y Ambros (1973) afirmaron que los resultados de Bird y Turian (1964) eran insuficientes para la determinación de la curva de flujo, debido principalmente a que la distribución de esfuerzos cortantes en el aparato es desconocida. En este sentido, dichos autores plantearon que el patrón de flujo en el aparato se comporta como se muestra en la Figura 2.13, presentada a continuación:

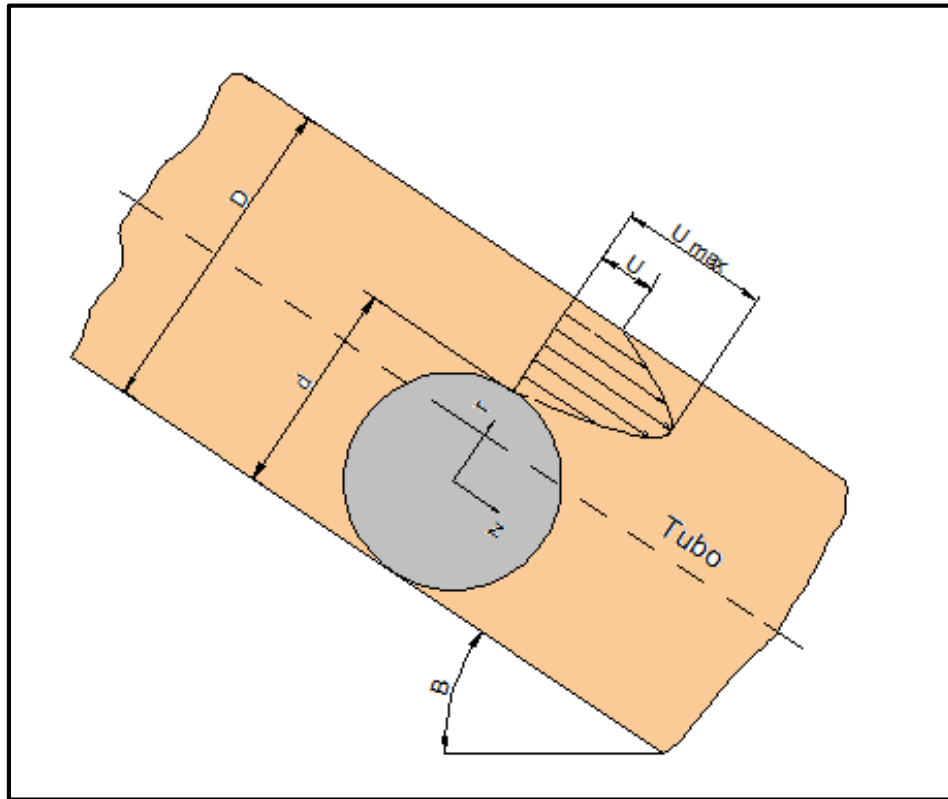


Figura 2. 13. Patrón de flujo en el reómetro de bola rodante
Fuente: Adaptado de Sestak y Ambros (1973).

Al respecto, los autores luego de un extenso desarrollo matemático concluyeron la Expresión (2.26):

$$\frac{1}{3} D (\rho_b - \rho_f) g \sin \beta \tag{2.26}$$

$$= m \left(\frac{2n + 1}{n} \pi U \right)^n \frac{D^{n+1/2}}{(D - d)^{2n+1/2}} J(n)$$

Donde:

m = consistencia

n = índice de fluidos de ley de potencia

U = velocidad de la bola

El parámetro n , se calcula mediante la Expresión (2.27):

$$n = \frac{\log(\sin \beta_1 / \sin \beta_2)}{\log(U_1 / U_2)} \quad (2.27)$$

Mientras que, $J(n)$ se obtiene a través de una cuadratura numérica gaussiana cuyos resultados son expresados Tabla 2.6, mostrada a continuación:

Tabla 2. 6. Cuadratura numérica gaussiana

n	$J(n)$	n	$J(n)$
0.15	2.0826	1.10	0.4674
0.20	1.8698	1.15	0.4391
0.25	1.6880	1.20	0.4129
0.30	1.5317	1.25	0.3884
0.35	1.3962	1.30	0.3657
0.40	1.2778	1.35	0.3445
0.45	1.1736	1.40	0.3247
0.50	1.0812	1.45	0.3062
0.55	0.9988	1.50	0.2889
0.60	0.9249	1.55	0.2727
0.65	0.8582	1.60	0.2575
0.70	0.7979	1.65	0.2432
0.75	0.7430	1.70	0.2299
0.80	0.6930	1.75	0.2173
0.85	0.6472	1.80	0.2055
0.90	0.6052	1.85	0.1944
0.95	0.5665	1.90	0.1840
1.00	0.5308	1.95	0.1742
1.05	0.4979	2.00	0.1649

Fuente: Sestak y Ambros (1973).

Obtenidos dichos valores, se despeja el valor de m

Paralelamente, propusieron la Expresión (2.28) y (2.29) para determinar una tasa media de deformación:

$$\bar{\gamma} = \frac{U D}{(D - d)^2} F(n) \quad (2.28)$$

Donde $F(n)$ se calcula como:

$$F(n) = \frac{2(1+n)(1+2n)^2}{n(2+n)(2+3n)} \quad (2.29)$$

De esta manera, se encuentran cada uno de los parámetros que caracterizan el modelo de ley de potencia.

Posteriormente, en 1991, Briscoe, Luckham y Ren, propusieron un método mucho más sencillo y práctico para la calibración del instrumento utilizando fluidos plásticos de Bingham, fluidos de ley de potencia y fluidos de Herschel-Bulkley, comparando los datos reológicos obtenidos con los generados por otro instrumento.

Dichos autores propusieron la Expresión (2.30) para fluidos plásticos de Bingham:

$$d(\rho_b - \rho_f)g \sin \beta = k_1 \tau_c + k_2 \eta_{pl} \dot{\gamma} = \phi \quad (2.30)$$

Donde

ϕ = parámetro de esfuerzo de corte equivalente

τ_c = esfuerzo de cedencia

η_{pl} = viscosidad plástica

k_1 = constante relacionada al esfuerzo de cedencia

k_2 = constante relacionada a la viscosidad plástica

Para fluidos de Herchel-Bulkley, la Expresión (2.30) se expresa como la Expresión (2.31):

$$d (\rho_b - \rho_f)g \sin \beta = k_1 \tau_c + k_2 K (\dot{\gamma})^{k_3 n} = \phi \quad (2.31)$$

Donde:

k_2 = constante relacionada a la consistencia

k_3 = constante relacionada al índice de Herchel-Bulkley

Asimismo, los autores proponen la Expresión (2.32) para determinar la tasa de corte equivalente:

$$\dot{\gamma} = \frac{V_{media\ bola}}{d_{media\ bola-tubo}} = \frac{V_{media\ bola}}{\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}} = \frac{4 \cdot d \cdot V_{media\ bola}}{(D^2 - d^2)} \quad (2.32)$$

Obtenidos estos valores, se efectúa una gráfica (ϕ vs $\dot{\gamma}_r$), que al comparar con los datos obtenidos con otros reómetros (según cada caso) permiten encontrar las constantes k_1 , k_2 y k_3 según el modelo reológico que caracterice al fluido. De esta manera, se ajustan los valores obtenidos a parámetros reológicos reales.

El presente trabajo de investigación tomará en cuenta este método (Briscoe, Luckham y Ren, 1991) para la obtención de los parámetros reológicos. En el siguiente capítulo se suministra mayor información sobre la calibración del instrumento

2.8 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta utilizada para simular fenómenos donde se encuentre presente el movimiento o interacción de fluidos. CFD trabaja resolviendo las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos (continuidad, energía y momentum) a través de su discretización sobre una región de interés con condiciones específicas conocidas.

Se denomina discretización al proceso de convertir las ecuaciones de transporte que gobiernan el fenómeno en un grupo de ecuaciones de valores discretos de la variable. Existen algunas técnicas para realizar este proceso, dependiendo de los principios en que se basen, las más usadas son: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Entre ellas, la más comúnmente utilizada en los códigos de los programas de CFD (entre ellos ANSYS-14.5) es el de volúmenes finitos.

Para ejemplificar la forma en la que el método de volúmenes finitos discretiza las ecuaciones de transporte, se considerará la difusión bidimensional de una propiedad ϕ en estado estable. Tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi} = \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) \quad (2.33)$$

Donde:

Γ = Coeficiente de difusión

S_{ϕ} = Terminio fuente

Suponiendo una porción bidimensional de una malla estructurada, como se muestra en la Figura 2.14:

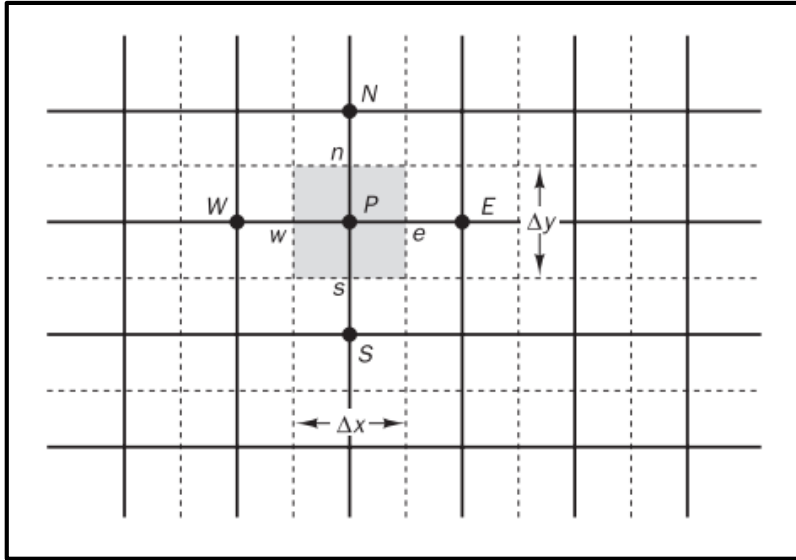


Figura 2. 14. Malla estructurada bidimensional
Fuente: Tomado de Versteeg y Malalasekera (2007).

Donde lo sombreado es un volumen ficticio alrededor del nodo “P”.
Integrando la ecuación 2.33 sobre el volumen de control, se obtiene:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx \cdot dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx \cdot dy + \int_{\Delta V} S_{\phi} dV = 0 \quad (2.34)$$

Sabiendo que $A_e = A_w = \Delta y$; $A_n = A_s = \Delta x$, se obtiene:

$$\left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (2.35)$$

Aplicando las aproximaciones del método de volúmenes finitos, se puede escribir las expresiones para el flujo a través de las diferentes caras del volumen de control:

$$\text{Flujo a través de la cara Oeste} = \Gamma_w A_w \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_w = \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x_{WP}} \quad (2.36)$$

$$\text{Flujo a través de la cara Este} = \Gamma_e A_e \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_e = \Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{PE}} \quad (2.37)$$

$$\text{Flujo a través de la cara Sur} = \Gamma_s A_s \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_s = \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta y_{SP}} \quad (2.38)$$

$$\text{Flujo a través de la cara Norte} = \Gamma_n A_n \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_n = \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta y_{PN}} \quad (2.39)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores y organizando los términos, se puede obtener:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}} + \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}} + \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}} + \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{PN}} - S_p \right) \phi_P \\ & = \left(\frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}} \right) \phi_w + \left(\frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{PE}} \right) \phi_E + \left(\frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}} \right) \phi_S + \left(\frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{PN}} \right) \phi_N + S_u \end{aligned} \quad (2.40)$$

Una simulación en CFD se divide básicamente en tres etapas (Schäfer, 2006), las cuales se señalan en la Figura 2.15, presentada a continuación:

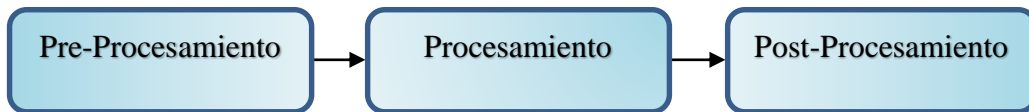


Figura 2. 15. Diagrama de proceso de Simulación en CFD

Cada etapa, por su parte, comprende una serie de pasos que son enumeradas en las Figura 2.16, Figura 2.17 y Figura 2.18, respectivamente:

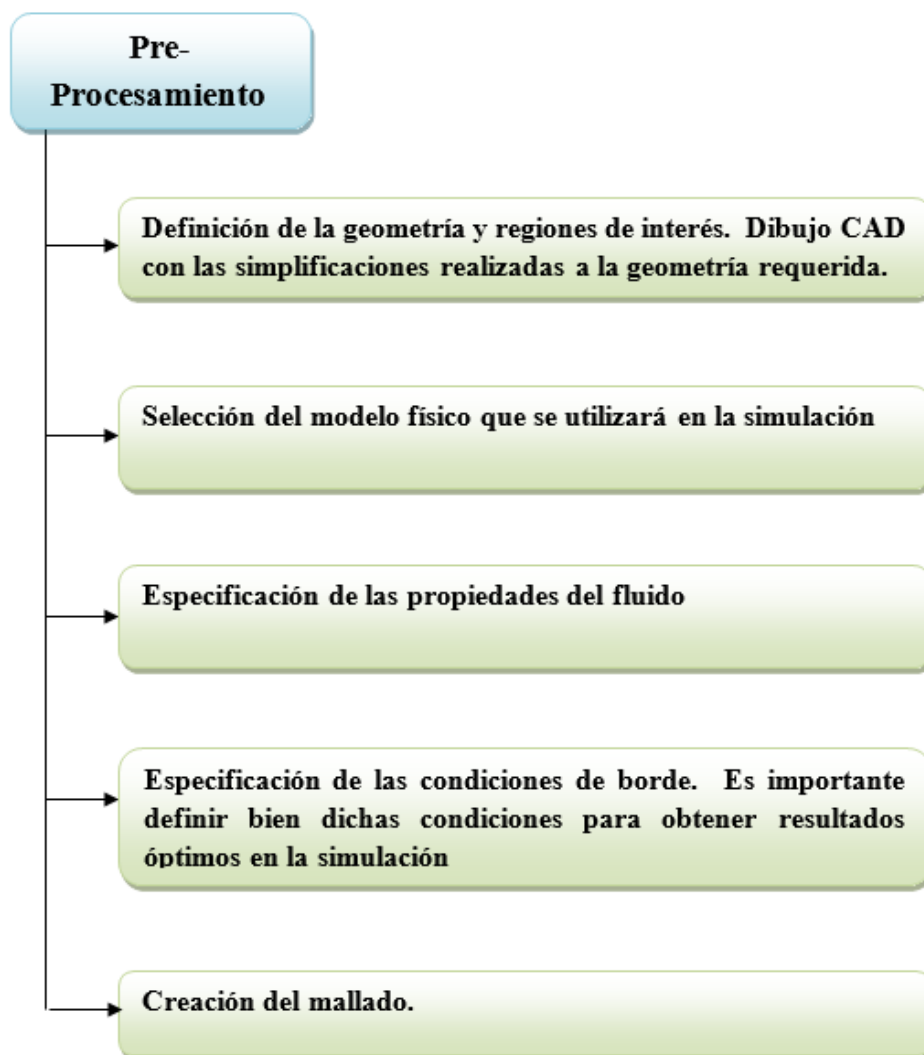


Figura 2. 16. Diagrama de los pasos del Pre-Procesamiento en CFD

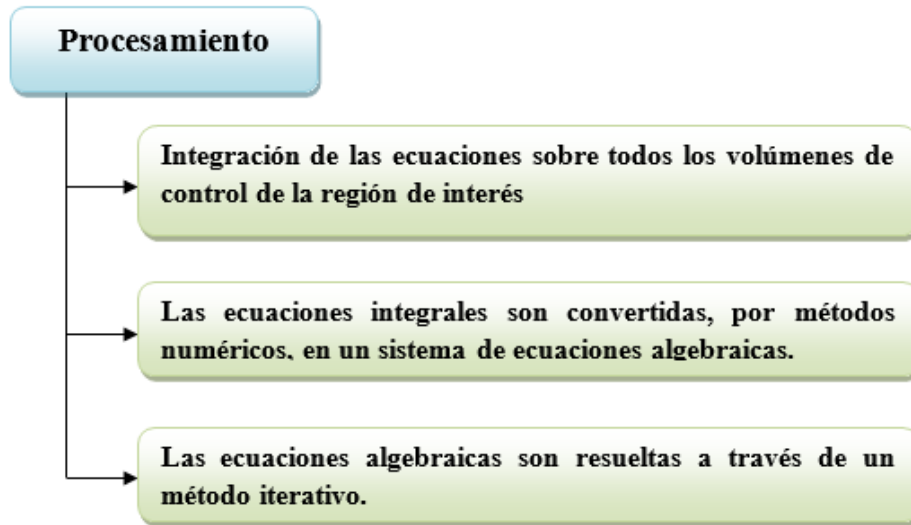


Figura 2. 17. Diagrama de los pasos del Procesamiento en CFD

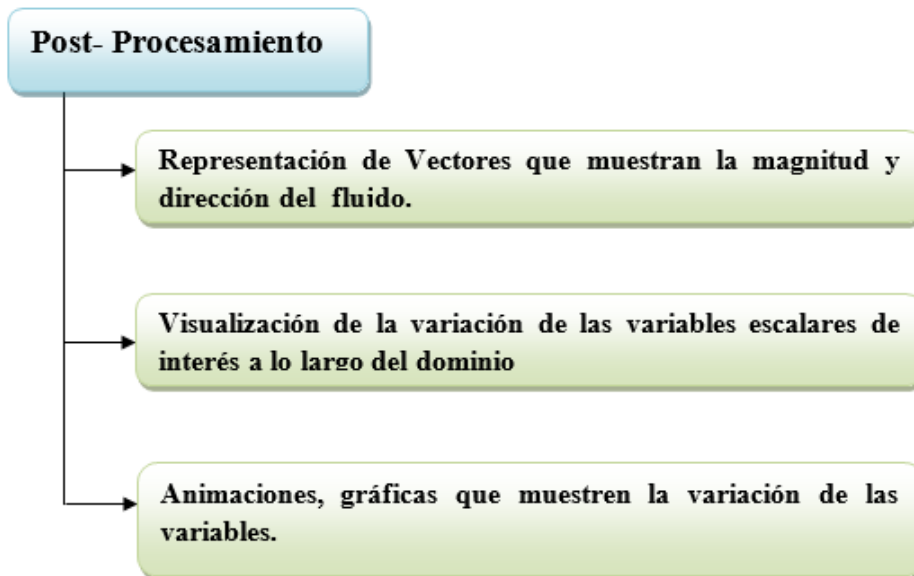


Figura 2. 18. Diagrama de los pasos del Post-Procesamiento en CFD

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo tiene como finalidad detallar las técnicas y los procedimientos desarrollados en el presente trabajo. La investigación es de carácter exploratoria, de tipo experimental. En este orden de ideas, se explican los aspectos tomados en cuenta para la construcción del dispositivo, la determinación de los factores controlables, el diseño de experimentos y los materiales utilizados. Seguidamente, se detalla el procedimiento para la obtención de datos, el método utilizado para calibración del instrumento y el procedimiento llevado a cabo para la efectuar la simulación numérica.

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REÓMETRO DE BOLA RODANTE

El diseño del reómetro de bola rodante estuvo conformado de los siguientes elementos: una base o soporte del instrumento, un mecanismo de posicionamiento angular, tubos acrílicos (incluyendo un sistema para sellarlos y taparlos) y un componente para la sujeción de los mismos (*véase Figura 3.1*).

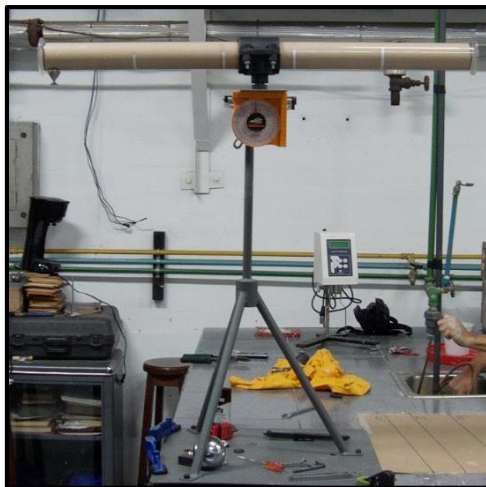


Figura 3. 1. Reómetro de bola rodante construido

3.1.1 Base o soporte del instrumento

La base o soporte del instrumento constituye un elemento de vital importancia, debido a que la precisión de cada una de las mediciones está relacionada a la estabilidad y rigidez que pueda conservar el reómetro durante la realización de las pruebas. Al respecto, se decidió optar por la fabricación de un trípode, que asegurara el equilibrio del equipo.

El trípode fue fabricado utilizando cuatro tubos de acero, tres correspondientes a las patas (20.50 mm de diámetro 440 mm de largo) y uno (20.50 mm de diámetro y 450 mm de largo) que sirvió de sostén al mecanismo de posicionamiento angular, además de una pieza de acoplamiento (sometida a procesos de torneado y fresado) a la que se soldaron las patas y el tubo sostenedor. La parte inferior de las patas fueron soldadas a unas láminas de fijación rectangulares (50 mm x 30 mm) de 3 mm de espesor, que a su vez fueron adaptadas a una placa cuadrada (500 mm x 500 mm), siendo fijada a través de sargentos de fijación a mesa especial para ensayos de laboratorio ubicada en el Laboratorio de Termodinámica de la Universidad Central de Venezuela (UCV).

3.1.2 Mecanismo de posicionamiento angular

El mecanismo de posicionamiento angular consistió en una base giratoria (fijada a través de un tornillo al trípode) unida a una lámina con una rejilla que se traslada a través de un eje transversal, permitiendo graduar el ángulo de trabajo deseado (para fijar dicha inclinación se aprieta un tornillo ubicado en el interior de la rejilla). La base fue fabricada doblando una lámina de acero (en cuya parte superior fue soldada una placa delgada donde se ajusta un inclinómetro para obtener precisión en las inclinaciones), mientras que la lámina de giro fue sometida a un proceso de fresado (rejilla) y leve doblado en la parte superior (donde se ubica el tornillo que lo sujeta a la base giratoria).

3.1.3 Tubos acrílicos, tapas y sellos

Los tubos utilizados para almacenar el fluido de trabajo son de material acrílico (polimetacrilato PMMA), los cuales debido a su elevado nivel de transparencia resultan adecuados para la realización de los ensayos propuestos, en los cuales debe percibirse visualmente el comportamiento de la bola rodante.

Dichos tubos deben necesariamente taparse para lograr mantener confinado el fluido, por lo cual se procedió al diseño de un sistema de tapas que ameritaba obligatoriamente contar con las siguientes características:

- Ser herméticas, para evitar la fuga del fluido a ensayar (para ello se realizó un diseño que permite la colocación de sellos)
- Ser livianas.
- Permitir su fácil colocación y remoción.
- Poseer la capacidad de remover el fluido sobrante sin permitir el ingreso de aire al tubo.

Se decidió fabricar las tapas con material acrílico (similar al de los tubos) debido a su poco peso y fácil mecanizado. Las dimensiones de las tapas se establecieron partiendo de las condiciones geométricas necesarias para la instalación de los sellos.

Los sellos fueron seleccionados según el procedimiento estandarizado especificado en el catálogo de un fabricante. Para ello, se realizó un dimensionamiento del alojamiento del sello. De esta manera, los sellos seleccionados para cada sistema de tapas se muestran a continuación (*Tabla 3.1*):

Tabla 3. 1. Dimensiones del Alojamiento del Sello para cada sistema de tapas

Sistema de tapas	DI (mm)	O- Ring Seleccionado	DI (mm) O- ring
1	31,2	W 1.78; 2-024	28,3
2	56,6	W 1.78; 2-034	53,7
3	82,3	W 3.54; 2-034	75,69

3.1.4 Componente para la sujeción de los tubos acrílicos

El componente para la sujeción de los tubos acrílicos se diseñó con un tubo roscado (soldado en su parte inferior a la base giratoria del mecanismo de posicionamiento angular) donde se acoplaron las abrazaderas de diferentes diámetros según la prueba a realizar. Estas últimas se tratan de abrazaderas de uso agrícola para riego, las cuales cuentan en su parte inferior con una salida de ½ pulgada (donde generalmente se acoplan mangueras pero que en este caso sirvió para adaptarla al tubo roscado). Además, internamente se les colocó goma antiresbalante para asegurar la sujeción del tubo.

3.2 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES CONTROLABLES

3.2.1 Concentración

Alves y otros (2008) estudiaron la reología de muestras de caolín y demostraron que la concentración de sólidos era el factor de mayor influencia en la viscosidad de dicha suspensión. De igual forma, dichos investigadores probaron que para concentraciones menores al 70% los efectos del pH son despreciables. Despreciando, al igual que Coussot (1997), la distribución de tamaños entre las partículas, el presente trabajo tomó en consideración la concentración como factor controlable más relevante en lo concerniente a la mezcla.

En este sentido, se procedió, a través de pruebas piloto, a determinar el rango práctico de concentración. El límite inferior fue dado por aquella concentración en la cual la mezcla empezó a presentar un esfuerzo de cedencia (esfuerzo necesario para empezar a fluir) mientras que el límite superior fue dado por aquella concentración en la cual le resultara imposible a la bola iniciar movimiento.

3.2.2 Relación de diámetro de bola y diámetro de tubo

Hubbard y Brown (1943) realizaron un análisis dimensional del reómetro de bola rodante y, entre otras cosas, demostraron la influencia de la relación entre el diámetro de bola (d) y el diámetro del tubo (D) para la calibración del instrumento, es decir, para la proyección de los resultados obtenidos a resultados reales.

Briscoe, Luckham y Ren (1991), además de otros investigadores, afirman que, debido a los efectos de pared, la relación d/D debe estar en un rango de valores entre 0,55 y 0,85, aunque otros autores como Hasan (1986) sugieren valores mayores a 0,707. El presente trabajo de investigación tomó en cuenta el primer rango, evaluando, sin embargo, una relación de diámetros por debajo y una por encima del mismo para una de las concentraciones, con la intención de observar variaciones correspondientes. Al respecto, se contó con diámetros de bola (mm) de 26; 38 y 73,45; y diámetros de tubo (mm) de 31,2; 56,9 y 82,5. Las combinaciones y relaciones geométricas establecidas se presentan en la Tabla 3.2:

Tabla 3. 2. Combinaciones de diámetros de bola y tubo

Combinaciones Diámetro de bola y tubo				
Diámetro de bola (mm)	Diámetro de Tubo (mm)			Relación d/D
	Pequeño	Mediano	Grande	
	31,2	56,9	82,5	
Pequeña	26	-	-	0,83
	-	26	-	0,46
Mediana	-	38	-	0,67
Grande	-	-	73,45	0,89

Nota: Las celdas vacías (-) corresponden a los diámetros de bola que no fueron ensayados para un determinado diámetro de tubo.

3.2.3 Ángulo de inclinación del instrumento

Algunos investigadores (Sestak y Ambros, 1973; Bagchi y Chhabra, 1991), han señalado un rango práctico de ángulos de inclinación en el cual el instrumento proporciona resultados satisfactorios. Sin embargo, se decidió determinar un rango de trabajo propio entendiendo las particularidades del fluido en estudio.

Es fundamental resaltar que la cantidad de puntos obtenidos en el reograma depende del número de pruebas efectuadas con el instrumento a diferentes ángulos, de allí la importancia de considerar este factor en el diseño inicial del experimento.

De esta manera, en cada concentración y para cada una de las relaciones de diámetro, se procedió inicialmente a determinar el ángulo correspondiente al esfuerzo de cedencia, es decir, aquella inclinación en la cual la bola empezara a moverse. A su vez, se fijó un límite superior de 60° , al igual que Bagchi y Chhabra (1991), considerando únicamente aquellas mediciones que proporcionen tasas de deformación menores a 100 s^{-1} . Para la determinación de los ángulos, se utilizó sistema de proyección con un apuntador laser (ubicado en

la misma placa del inclinómetro) que proyectó las diferentes inclinaciones en una pared, la cual se subdividió según el ángulo representado. Lo anterior permitió lograr intervalos de variación de $0,5^\circ$, incrementando considerablemente la precisión al instrumento (véase *Figura 3.2*).



Figura 3. 2. Sistema para la medición de ángulos

3.3 DISEÑO FACTORIAL DE EXPERIMENTOS

El presente trabajo se basó en un diseño factorial de experimentos, claramente definido para 3 factores, considerando diferentes niveles que fueron explicados anteriormente. Posteriormente, a través de la comparación de los datos obtenidos con otros valores de parámetros reológicos suministrados en trabajos del Prof. Coussot (1997) se procedió a evaluar la mejor combinación entre las diferentes relaciones de diámetros (bola y tubo) y las diferentes concentraciones. Se fijó un mínimo de 10 puntos reológicos por reograma, cifra bastante cercana a las cantidades suministradas por otros trabajos de naturaleza

semejante (Coussot, 1997; Arvelo y Díaz, 2009; Carrasco, 2011). Sin embargo, en los casos necesarios, se tomaron datos adicionales para refinar la data y obtener un comportamiento reológico más detallado.

La Expresión (3.1) se utilizó para calcular el número mínimo de ensayos tomando en cuenta un diseño factorial de experimentos de 3 factores:

$$\begin{aligned} & \text{Número de experimentos} \\ & = (\text{Niveles Factor 1}) * (\text{Niveles Factor 2}) \\ & * (\text{Niveles Factor 3}) \\ & * (\text{Número mínimo de réplicas}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

El número mínimo de réplicas para un experimento de esta naturaleza es de 2, debido a la sensibilidad de la variable de respuesta (viscosidad del flujo) con respecto a los factores controlables (Martínez y otros, 2011).

Es importante tener en cuenta que, los niveles de la concentración pueden variar según la relación de diámetros, por lo que se procedió a calcular un mínimo de experimentos para cada combinación de diámetros, realizándose una totalización que permitió comprobar que el número de mínimo de experimentos, de acuerdo a los niveles establecidos, fue superado.

3.4 MATERIALES UTILIZADOS PARA LAS PRUEBAS

Para la preparación de las mezclas a ensayar fueron tomadas en cuenta las recomendaciones efectuadas por Blanco, García, Berríos y Méndez (2003). En este sentido, las mezclas a ensayar fueron de tipo artificial. Los materiales utilizados fueron agua para la fase líquida y caolín para la fase sólida.

En este orden de ideas, el caolín utilizado fue de tipo industrial “C-6” (Blanco gris Malla 400), con la siguiente composición química (véase *Tabla 3.3*):

Tabla 3.3. Composición química del caolín utilizado

Compuesto	Porcentaje (%)
SiO_2	65,08
Al_2O_3	24,15
Fe_2O_3	0,5
TiO_2	Trazas
CaO	0,55
MgO	0,2
Perdida de rojo	4,82

Fuente: Arvelo y Díaz (2009)

Asimismo, un estudio granulométrico realizado en el Instituto de Mecánica de Fluidos de la UCV aportó los datos mostrados en la *Tabla 3.4*:

Tabla 3.4. Estudio granulométrico del caolín utilizado

Granulometría (Malla 400)	Porcentaje %
Pasante	99,1
Retención	0,9

Fuente: Arvelo y Díaz (2009)

El solvente utilizado fue agua destilada tratada en el Laboratorio de Termodinámica de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCV a 20°C

3.5 PROCEDIMIENTO TEÓRICO PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Se tomaron en cuenta las Expresiones (3.2) y (3.3) para preparar las diferentes concentraciones de mezcla deseadas:

$$C_v = \frac{V_{Caolin}}{V_{Mezcla}} \quad (3.2)$$

A su vez,

$$V_{Mezcla} = V_{Caolin} + V_{agua} \quad (3.3)$$

El volumen de la mezcla es un parámetro definido por los investigadores, según la cantidad necesaria a utilizar en las experiencias. Blanco y otros (2003) recomiendan preparar un volumen mayor a 3 litros. Conociendo este valor, y el de la concentración deseada, se despeja el volumen de caolín, como se muestra en la Expresión (3.4):

$$V_{Caolin} = C_v \cdot V_{Mezcla} \quad (3.4)$$

Entonces, de la Expresión (3.5), se obtiene el volumen de agua:

$$V_{agua} = V_{Mezcla} - V_{Caolin} \quad (3.5)$$

Seguidamente se procede a obtener la masa del soluto, por medio de la Expresión (3.6):

$$M_{Caolin} = \rho_{Caolin} \cdot V_{Caolin} \quad (3.6)$$

Sin embargo, el caolín a condiciones ambientales posee un porcentaje de agua correspondiente a 1% de su masa (Toshio, 2004). Por lo tanto, es pertinente encontrar una expresión modificada para obtener la masa de caolín. Lo anterior se muestra en la Expresión (3.7)

$$M_{Caolin\ mod} = M_{Caolin} + M_{Caolin} \cdot 1\% \quad (3.7)$$

Asimismo, la masa de agua M_{agua} para la mezcla se ve modificada, quedando como se muestra en la Expresión (3.8):

$$M_{agua\ mod} = \rho_{agua} \cdot V_{agua} - M_{Caolin\ mod} \cdot 1\% \quad (3.8)$$

3.6 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Una vez realizados los cálculos teóricos correspondientes, se procedió a obtener en una balanza electrónica la magnitud requerida correspondiente a la masa del agua y de caolín (se fijó un volumen de mezcla de 10 litros para cada concentración). Inicialmente el procedimiento se realizó para el agua, vertiendo la misma en un recipiente de plástico, luego se fue vertiendo el caolín y mezclando manualmente con un agitador de hierro para evitar la formación de grumos y lograr una mezcla homogénea. La velocidad aproximada de agitación fue de 100 rpm. Una vez terminado el procedimiento los recipientes fueron hermetizados para evitar la contaminación de las muestras y se dejaron reposar (*véase Figura 3.3*).



Figura 3. 3. Mezcla Agua-Caolín

3.6.1 Determinación teórica de la densidad

Analíticamente, la densidad de la mezcla se obtiene mediante la Expresión (3.9):

$$\rho_{mezcla} = \frac{M_{mezcla}}{V_{Mezcla}} = \frac{M_{Caolin\ mod} + M_{agua\ mod}}{V_{Caolin} + V_{agua}} \quad (3.9)$$

Separando la expresión anterior y poniéndola en función del volumen, queda la Expresión (3.10):

$$\rho_{mezcla} = \frac{\rho_{caolin} \cdot V_{caolin}}{V_{Caolin} + V_{agua}} + \frac{\rho_{agua} \cdot V_{agua\ mod}}{V_{Caolin} + V_{agua}} \quad (3.10)$$

Se puede deducir la Expresión (3.11):

$$(1 - C_v) = \frac{\rho_{agua} \cdot V_{agua\ mod}}{V_{caolin} + V_{agua}} \quad (3.11)$$

Considerando la expresión anterior, obtenemos la Expresión (3.12):

$$\rho_{mezcla} = \rho_{caolin} \cdot C_v + \rho_{agua} \cdot (1 - C_v) \quad (3.12)$$

3.6.2 Determinación experimental de la densidad

Una vez obtenido el valor teórico de la densidad se procede a calcular su valor de forma experimental con la intención de efectuar comparaciones. Lo anterior se realiza utilizando una balanza especial para lodos donde se coloca una porción de la mezcla preparada. La misma cuenta con un brazo de escala graduado con un contrapeso deslizante, un sistema de nivel de burbuja y compartimiento de calibración donde se introducen diminutas bolitas con este fin.

Calibrada la balanza, se introduce la porción de muestra llenando completamente el compartimiento y se procede a taparlo. Luego, se coloca la balanza en equilibrio con el contrapeso, fijándose en que la burbuja del nivel este ubicada en el centro. De esta manera, se obtiene el valor de la densidad (*véase Figura 3.4*).

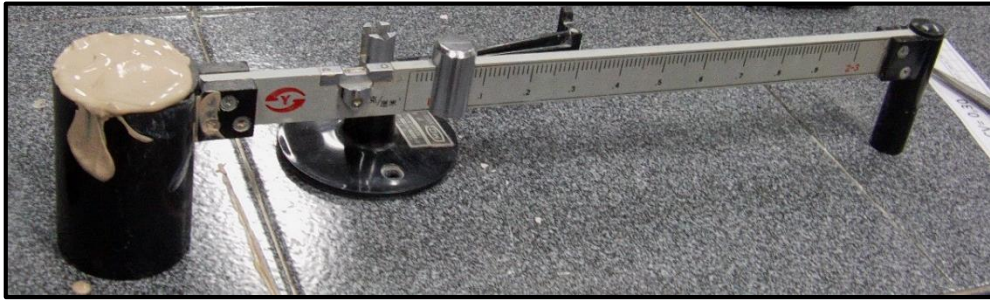


Figura 3. 4. Balanza llena con Mezcla de Agua-Caolín

3.7 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS

Para la obtención de los parámetros reológicos se tomó en cuenta el procedimiento seguido por Briscoe, Luckham y Ren (1991) quienes propusieron la metodología más actualizada y completa para la caracterización reológica de fluidos no newtonianos con el reómetro de bola rodante. Dichos autores desarrollaron un método de calibración para dicho instrumento propio para fluidos plásticos de Bingham, fluidos de Ley de Potencia y fluidos de tipo Herschel-Bulkley. En el presente trabajo de investigación se asumió este último modelo para caracterizar las muestras preparadas. El mismo, es el más general de los modelos reológicos y ha sido uno de los más utilizados en muestras con granulometrías finas, sobre todo a bajas velocidades de deformación, donde su representación tiene un grado razonable de aproximación (Coussot, 1997)

Los investigadores Briscoe, Luckham y Ren (1991), a partir del análisis de un balance de fuerzas, expresaron Ecuación (2.31) para fluidos de Herschel-Bulkley (mostrada en el capítulo anterior):

$$\phi = (\rho_b - \rho_f)g \sin \beta = k_1 \tau_c + k_2 K (\dot{\gamma})^{k_3 n}$$

Donde ϕ está expresado en unidades de esfuerzo (Pascal) y puede ser denominado “parámetro de esfuerzo de corte equivalente”. Por su parte, k_1 , k_2 y k_3 son constantes dimensionales que fueron obtenidas a través de la

calibración del instrumento, utilizando datos obtenidos a través de otros métodos reométricos (Coussot, 1997).

Asimismo, estos investigadores (Briscoe, Luckham y Ren, 1991) usaron la velocidad media de la bola y la brecha media entre la bola y el tubo, para encontrar una correlación que les permitiera definir una tasa de corte equivalente. Dicha expresión corresponde a la Ecuación (2.32), mostrada en el capítulo anterior:

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot d \cdot V_{media\ bola}}{(D^2 - d^2)}$$

Para encontrar los diferentes parámetros reológicos los autores recomiendan efectuar una gráfica (ϕ vs $\dot{\gamma}_r$), perfectamente factible con los valores obtenidos experimentalmente. Posteriormente se procede a la calibración del equipo.

3.8 CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO

Para cada combinación tubo-bola se realizó una calibración, es decir, una aproximación de los valores obtenidos a puntos reológicos reales, tomando en cuenta dos pasos:

En primer lugar, se calculó un ϕ para el ángulo θ donde la bola empieza a rodar es decir, aquel donde la $V_{media\ bola}$ es más cercana a cero (0) (para cada concentración). Dicho valor se iguala a la expresión $k_1 \tau_c$. Luego, se despejan los valores de k_1 para cada concentración, asumiendo que $\tau_c = \tau_{c\ ref}$, y se saca un promedio de la constante. Con $k_{1\ prom}$ se encuentran los valores reales ($\tau_{c\ real}$) para todas las concentraciones.

Para la obtención del valor de la consistencia y del parámetro n de fluidos de Herschel-Bulkley, se realiza una aproximación de los datos obtenidos a dicho modelo utilizando la herramienta Solver de Excel (dicha herramienta minimiza el valor de varianza total entre los datos obtenidos y el modelo de Herschel-Bulkley, indicando los parámetros que más se adaptan a dicha relación). El valor de la consistencia obtenido se iguala a la expresión $k_2 K$ (para cada concentración) mientras que el valor del parámetro n se iguala a $k_3 n$. Posteriormente, se despejan los valores de k_2 y k_3 para cada concentración, asumiendo que $K = K_{ref}$, y que $n = n_{ref}$, sacando un promedio de las constantes. Con $k_{2 prom}$ y $k_{3 prom}$ se encuentran los valores reales (K_{real} y n_{real}) para todas las concentraciones.

3.9 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE POR REPETIBILIDAD

La incertidumbre por repetibilidad se obtuvo a través de la Expresión (3.13), que se muestra a continuación:

$$\text{incertidumbre por repetibilidad} = \frac{s}{\sqrt{n_r}} \quad (3.13)$$

Donde:

s = Desviación estándar

n_r = Número de repeticiones

Por su parte, la desviación estándar está dada por la Expresión (3.14):

$$(3.14)$$

3.10 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL REÓMETRO DE BOLA RODANTE

3.10.1 Identificación del Dominio

Para simplificar el problema y facilitar su simulación, se debe seleccionar adecuadamente el dominio. En el caso del reómetro de bola rodante se desea modelar el momento en el que se presenta el esfuerzo de cedencia, al comenzar el movimiento de la esfera y, posteriormente, conocer el perfil de velocidades una vez desarrollado el flujo. Para esto, sólo se simuló el reómetro con la relación de diámetros $d/D= 0.83$ y con la concentración de 15%.

3.10.2 Hipótesis

Las consideraciones tanto iniciales como geométricas para la simulación, fueron las siguientes:

- Se modelará el fluido como una sustancia homogénea, cuya densidad se igualó a la obtenida experimentalmente para la concentración de 15%
- Movimiento de traslación uni-direccional (Eje - Z).
- Movimiento rotacional en el eje X.
- Esfera en reposo para $t=0$.
- Sobre la esfera solo actúa el valor de la componente de la gravedad en la dirección del eje $-Z$, según el ángulo que se simule.

3.10.3 Creación de geometría tridimensional

Partiendo de las dimensiones reales de la esfera y el tubo, se creó la geometría tridimensional usando el módulo de ANSYS 15 de modelado Desing

Modeler. Se mantuvieron las características geométricas de mayor relevancia como diámetro de la esfera y diámetro interno del tubo.

Para los efectos de la simulación se descartaron aquellas características y accesorios que no influían en el fenómeno. Así, en la creación de la geometría se obviaron las tapas del reómetro, espesor del tubo, material del tubo y la rugosidad de la esfera. Por último, se aprovechó la simetría tanto geométrica como física del fenómeno y solo se simuló la porción derecha del reómetro de bola rodante.

La geometría tridimensional, según lo señalado anteriormente, quedó de la siguiente manera (véase Figura 3.5 y Figura 3.6)

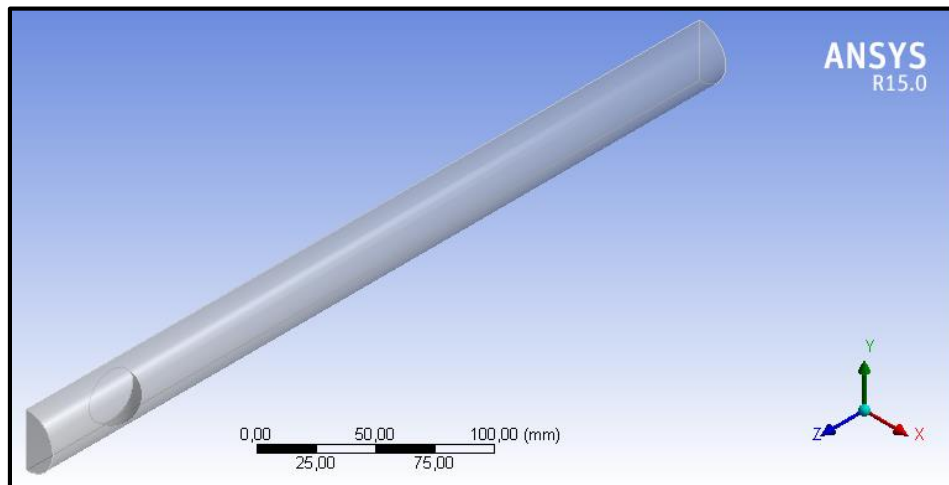


Figura 3. 5. Vista isométrica del reómetro de bola rodante

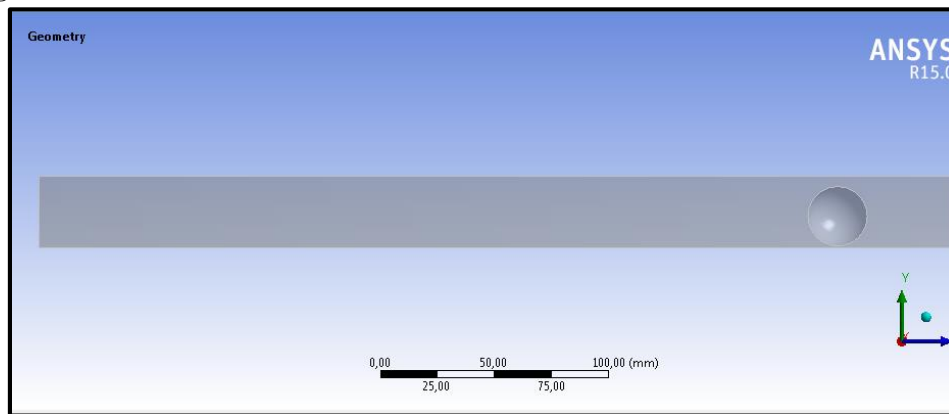


Figura 3. 6. Vista frontal del reómetro de bola rodante

3.10.4 Mallado

El objetivo de un código CFD (como el que resuelve ANSYS –CFX) es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes en la geometría seleccionada. El código de CFD resuelve dichas ecuaciones en una serie de puntos de la geometría en cuestión mediante métodos numéricos. Por lo tanto, el primer paso para la resolución de dichas ecuaciones es seleccionar los puntos donde se llevará a cabo la discretización. Este proceso se denomina “Mallado”. Para generar dicha malla, el dominio se divide en pequeños subdominios llamados “Elementos”.

La geometría de dichos elementos depende de las dimensiones sobre la que se esté trabajando y de las características propias del problema. En este caso, al ser un problema de modelado de un fluido tridimensional, los elementos con los que se cuenta son: Tetraedros, hexaedros, prismas y pirámides.

Para la simulación del reómetro de bola rodante se realizó un mallado no estructurado. Debido a las características del problema, donde los efectos de relevancia se encuentran en la periferia de la esfera, a dicho mallado se le aplicó el método de “Inflation”, el cual crea capas de elementos prismáticos que permiten obtener mejor resultados cuando se desea conocer viscosidades, esfuerzos cortantes, tasas de deformación, entre otros.

De igual forma, fue realizado un estudio de convergencia. Para ello, se tomó como punto de referencia la velocidad promedio de la esfera.

3.10.5 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde se especificaron de forma tal que se cumpliera con las características del fenómeno. Las mismas fueron:

3.10.5.1 Tapa 1

Se le asignó la condición de contorno *Pared*. Asimismo, se le dio la característica de *No deslizamiento* y de *malla estacionaria* (Figura 3.7)

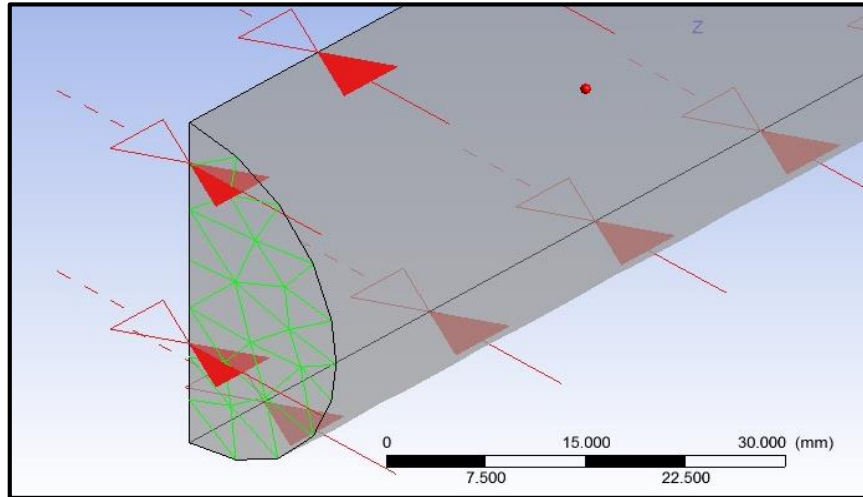


Figura 3. 7. Condición de Borde de la Tapa 1

3.10.5.2 Tapa 2

Se le asignó la condición de contorno *Pared*. Seguidamente, se le dió la característica de *No deslizamiento* y de *Malla Estacionaria* (Figura 3.8).

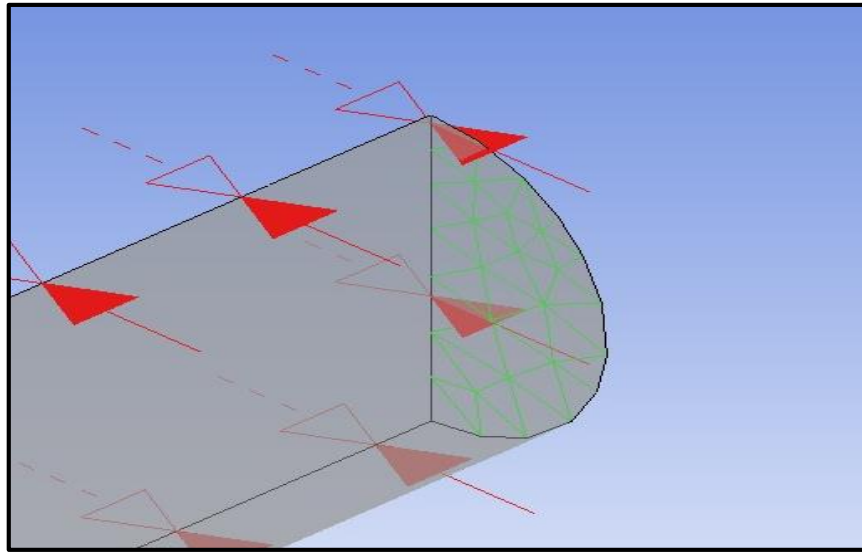


Figura 3. 8. Condición de Borde Tapa 2

3.10.5.3 Tapa Exterior del Fluido

Se le asignó la condición de contorno *Pared*. De igual manera, se le dió la característica de *No deslizamiento* y de movimiento de malla *Sin Especificar* (Figura 3.9).

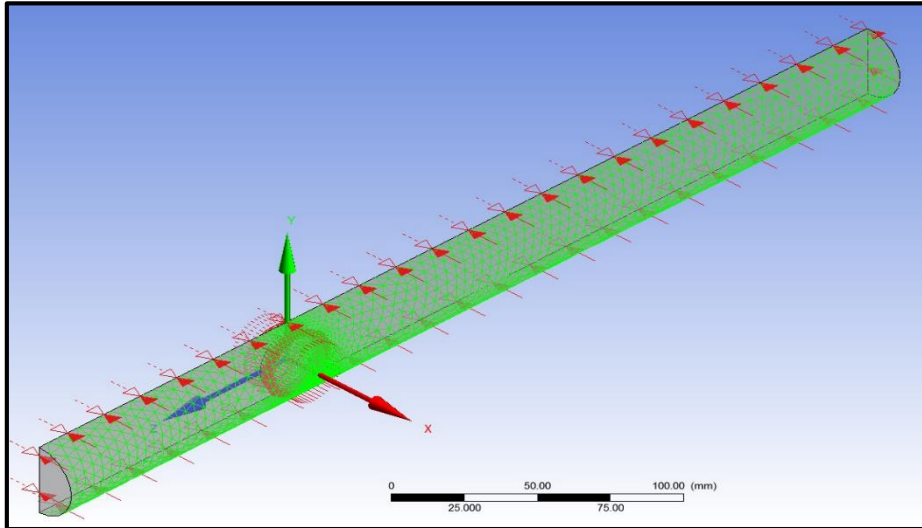


Figura 3. 9. Condición de Borde de Tapa Exterior

3.10.5.4 Simetría

Se estableció la condición de *Simetría*. A la misma se le dió la característica de movimiento de malla *Sin Especificar* (Figura 3.10).

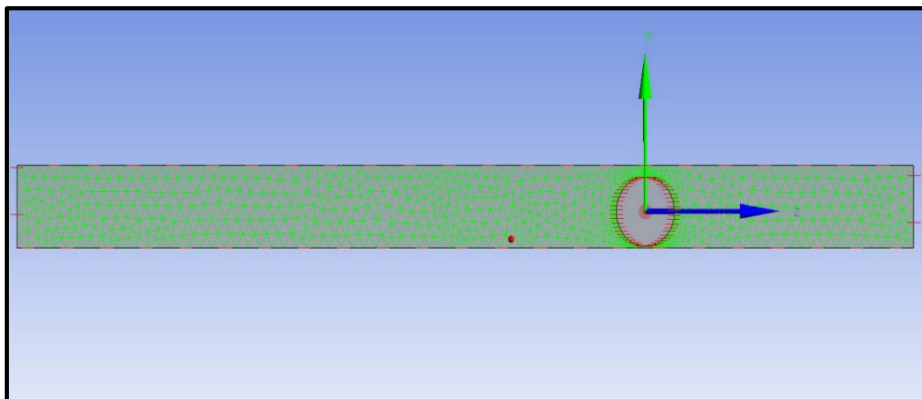


Figura 3. 10. Condición de borde de Simetría

3.10.5.5 Esfera

Se definió con la condición de borde *Pared*, a la cual se le asignó las características de *Cuerpo Rígido* y se estableció su movimiento (Figura 3.9). Las características del cuerpo rígido se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Características del Cuerpo Rígido

Cuerpo Rígido	
Masa del cuerpo	0,076 Kg
Momento de Inercia	
XX	5,1376 Kg. Mm ²
YY	5,1376 Kg. Mm ²
ZZ	5,1376 Kg. Mm ²
XY	0 Kg. Mm ²
XZ	0 Kg. Mm ²
YZ	0 Kg. Mm ²
Grados de Libertad	
Traslación	Eje Z
Rotación	Eje X
Fuerzas	
Gravedad	Dependiendo del ángulo a simular

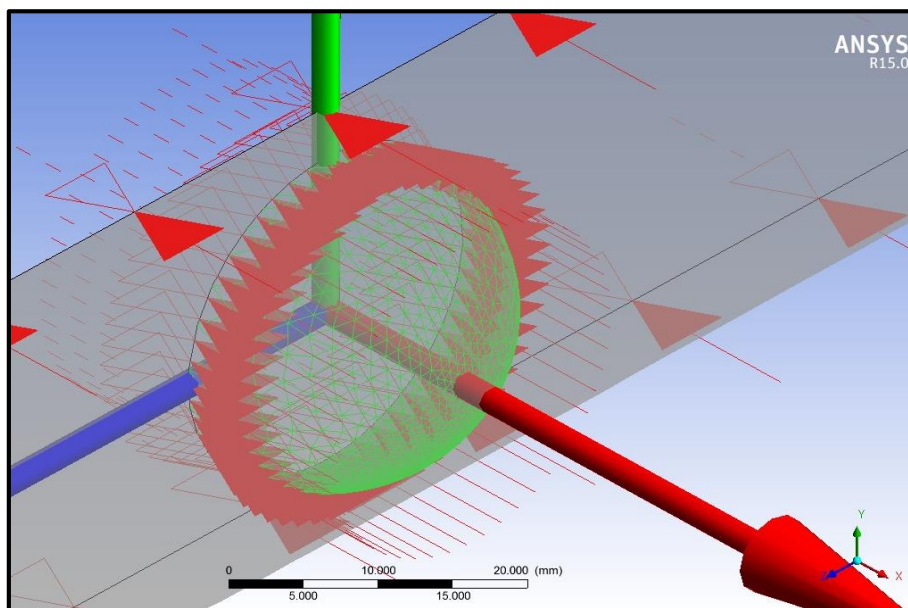


Figura 3. 11. Condición de borde de Esfera Rígida

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CÁLCULO DE MASA DE AGUA Y CAOLÍN

Una vez realizados los cálculos teóricos correspondientes, se procedió a la preparación de la mezcla, utilizando (para un volumen de 10 litros) las cantidades de agua y caolín mostradas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Masa de agua y masa de caolín utilizadas en la preparación de la mezcla

Mezcla (% en volumen)	Masa de agua (Kg)	Masa de Caolín (Kg)
15	8,194	3,975
20	7,750	5,300
25	7,199	6,625

4.2 DENSIDAD TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

Posteriormente, se efectuó la medición experimental de la densidad y se comparó con el valor teórico (véase Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Densidad teórica y experimental de la mezcla agua-caolín

Mezcla (% en volumen)	Densidad teórica (Kg/m ³)	Densidad Experimental (Kg/m ³)
15	1245,508	1245
20	1328,125	1300
25	1410,742	1375

Se evidenció una variación entre la densidad teórica y la experimental. Al dejar reposar la mezcla, la misma empezó a sedimentarse, cambiando naturalmente sus propiedades. Esto coincide con lo señalado por Blanco y otros (2003), quienes expresan el cambio en las propiedades de las mezclas con el transcurrir de los minutos.

4.3 RANGO DE LOS FACTORES CONTROLABLES

4.3.1 Concentración

Para determinar el rango de concentraciones útiles para la realización de pruebas con el reómetro de bola rodante se efectuaron ensayos piloto, obteniendo los resultados que se señalan en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3. Rango útil de concentraciones según la relación de diámetros

Rango útil de concentraciones		Relación de diámetros			
		0,46	0,67	0,84	0,89
Concentración (Cv)	Min	15%	15%	15%	15%
	Max	25%	25%	20%	20%

Se demostró que los reómetros con las diferentes configuraciones geométricas utilizadas permiten determinar el comportamiento reológico de flujos hiperconcentrados en el rango de concentración definido desde 15% a 25%, exceptuando los equipos con relación de diámetros $d/D=0,84$ y $d/D=0,89$, los cuales resultaron imprácticos con la concentración de 25%. Lo anterior, se produce como resultado de los efectos de pared en el cilindro, los cuales tienden a frenar o detener el movimiento, debiendo esperar un largo periodo de tiempo para que la bola empiece a rodar. Al transcurrir dicho periodo de tiempo, la

mezcla tiende a sedimentarse, presentándose como un fluido distinto al que se pretende caracterizar.

Es importante destacar que, la concentración de 20% se ensayó en cada una de las relaciones de diámetro, considerándose parámetro de comparación entre las diferentes relaciones geométricas existentes.

4.3.2 Ángulos de inclinación

El rango de ángulos de inclinación, tomando en cuenta el esfuerzo de cedencia como límite inferior y 60° como límite superior (Bagchi y Chhabra, 1991), valorando solo aquellas mediciones con tasas de deformación inferiores a 100 s^{-1} , resultó como se indica en la Tabla 4.4 (según la relación de diámetros correspondiente):

Tabla 4.4. Rango de ángulos de inclinación según la relación de diámetros

Rango de ángulos de inclinación			
Relación de diámetros (d/D)	Concentración (%)	Ángulo Mín (°)	Ángulo Max (°)
0,46	20	4,5	60
0,67	15	1	60
	20	4,5	60
	25	11,5	60
0,83	15	2	30
	20	7,5	50
0,89	20	12	60

Se notó que a medida que aumentó la concentración, el ángulo de inclinación para que la bola iniciara movimiento creció, para una misma relación de diámetros. Asimismo, el ángulo necesario para el inicio del movimiento de la esfera en una misma concentración fue mayor a medida que se aumentó la relación de diámetros. Sin embargo, en el caso de la relación de diámetros $d/D=$

0,46, el ángulo de cedencia resultó igual al de la relación $d/D= 0,67$, evaluándose esferas distintas en el mismo tubo. Lo último se debe a que, aunque la esfera menor tiene una masa menor, los efectos de pared decrecen en comparación con los de la esfera de mayor diámetro permitiéndole fluir a la misma inclinación. En el caso de la relación de diámetros $d/D=0,84$, se alcanzó el límite de tasas de deformación de 100 s^{-1} sin alcanzar el ángulo máximo de 60° .

4.4 DISEÑO FACTORIAL DE EXPERIMENTOS

En base a la expresión enunciada en el capítulo anterior, se procedió a determinar el número mínimo de experimentos, tal como se muestra en la Tabla 4.5

Tabla 4 5. Número mínimo de experimentos a realizar

Determinación número mínimo de experimentos				
Relación de diámetros (d/D)	Nivel concentración	Nivel de ángulos de inclinación	Repetitividad	Número minimo de experimentos
0,46	1	10	2	20
0,67	3	10	2	60
0,83	2	10	2	40
0,89	1	10	2	20
				140

Sin embargo, en algunas concentraciones fueron realizadas un número mayor de pruebas para refinar la data, efectuando el número de experimentos que se muestra en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6. Número total de experimentos realizados

Número total de experimentos			
Relación de diámetros (d/D)	Concentración (%)	Nro. Ángulos de inclinación	Nro. de experimentos
0,46	20	12	24
0,67	15	18	36
	20	15	30
	25	12	24
0,83	15	10	20
	20	13	26
0,89	20	12	24
			184

Se cumplió con el número mínimo de experimentos previsto, lo que permite asegurar cierto nivel de confiabilidad en los resultados de las pruebas efectuadas.

4.5 PROTOCOLO DE ENSAYO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS CON FLUJOS HIPERCONCENTRADOS EN EL REÓMETRO DE BOLA RODANTE

La caracterización reológica de los flujos hiperconcentrados con el reómetro de bola rodante debe constar de las siguientes etapas:

- Determinación del rango de los factores controlables
- Cálculo del número mínimo de experimentos
- Preparación de las mezclas.
- Medición los datos experimentales

Tanto la determinación del rango de los factores controlables como el cálculo del número mínimo de experimentos se detallan en el Capítulo III del presente trabajo.

A continuación se sistematiza una metodología para la preparación de las mezclas de agua-caolín y una metodología para la toma de datos experimentales.

4.5.1 Metodología para la preparación de mezclas de Agua-Caolín

1. Determinación de la cantidad de mezcla a preparar de acuerdo a la relación de diámetros a utilizar.
2. Utilizar la balanza electrónica para medir la masa de agua requerida, según el volumen calculado y la densidad correspondiente a la temperatura ambiental. Utilizar un vaso precipitado.
3. Verter el agua en el recipiente destinado a almacenar la mezcla.
4. Utilizar la balanza electrónica para medir la masa de caolín requerido, según el volumen calculado y la densidad correspondiente a la temperatura ambiental. Se utiliza un plato de laboratorio.
5. Se vierte el caolín en el recipiente donde se encuentra almacenada el agua.
6. A medida que se agrega el caolín, se debe agitar la mezcla. La agitación debe ser a velocidad constante, con una duración de por lo menos de 5 minutos adicionales luego de haber agregado la totalidad del caolín.

7. Antes de utilizar, la mezcla se debe dejar en reposo por lo menos durante 10 minutos.

4.5.2 Metodología para la toma de datos experimentales

1. *Medición de la densidad antes de realizar los ensayos experimentales:* antes de proceder a realizar el montaje experimental, se documentó la densidad de la mezcla a ensayar para evaluar la existencia de cambios significativos en la misma con respecto al momento de mezclado.
2. *Llenado del tubo con el fluido a ensayar e introducción de la esfera correspondiente:* Este proceso se realiza de forma lenta y paulatina, para evitar la formación de burbujas de aire que puedan interferir a la hora del ensayo.
3. *Sellado de los tubos:* El tubo, una vez lleno, se sella con tapas a las cuales se les adaptó un O-Ring.
4. *Colocación del tubo en la estructura del reómetro (trípode):* Una vez tapados los tubos, se coloca en la estructura de soporte del reómetro y se sujeta con unas abrazaderas. Luego de esto se posiciona el tubo en 0°.
5. *Colocación del tubo en el ángulo a ensayar.*
6. *Liberación de la esfera y medición del tiempo del recorrido:* Se libera la esfera de acero al retirar un imán que la mantiene en la

posición inicial del tubo. Paralelamente se inicia la medición del tiempo del recorrido de la esfera dentro del tubo.

7. *Posicionamiento en condiciones iniciales*: Se devuelve la esfera a su posición inicial y se retiene con un imán. Se deja el tubo en la posición de 0° por un tiempo de 5 min para que el fluido se reorganice. Luego de esto se procede a realizar la siguiente medición.
8. *Agitación del tubo*: Después de 10 mediciones, se retira el tubo y se procede a agitar durante 5 min. Luego de esto, se repiten los pasos 4 al 7.

4.6 RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.6.1 Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,67$

Con esta configuración geométrica se realizaron pruebas en concentraciones de 15%, 20% y 25%. Una vez obtenidos los valores de velocidad media para los diferentes ángulos de inclinación, se procedió a calcular los valores del parámetro de corte equivalente y de la tasa de deformación equivalente. Con dichos valores se obtuvo el Gráfico 4.1, Gráfico 4.2 y Gráfico 4.3, respectivamente.

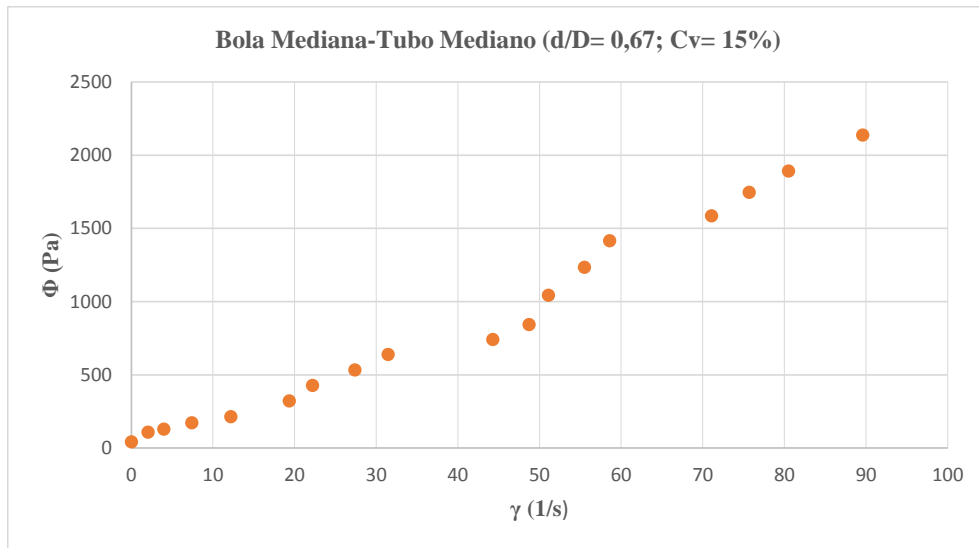


Gráfico 4.1. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 15 %

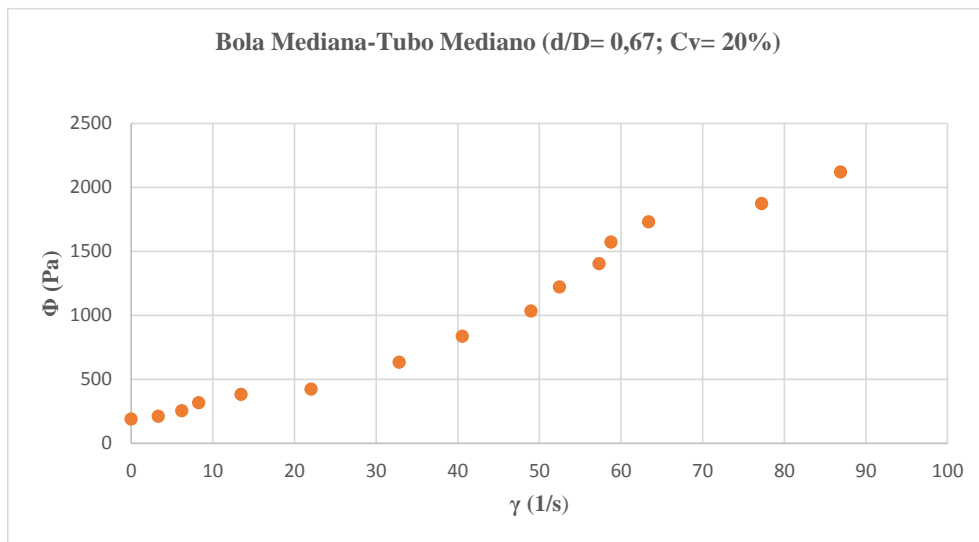


Gráfico 4.2. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 20 %

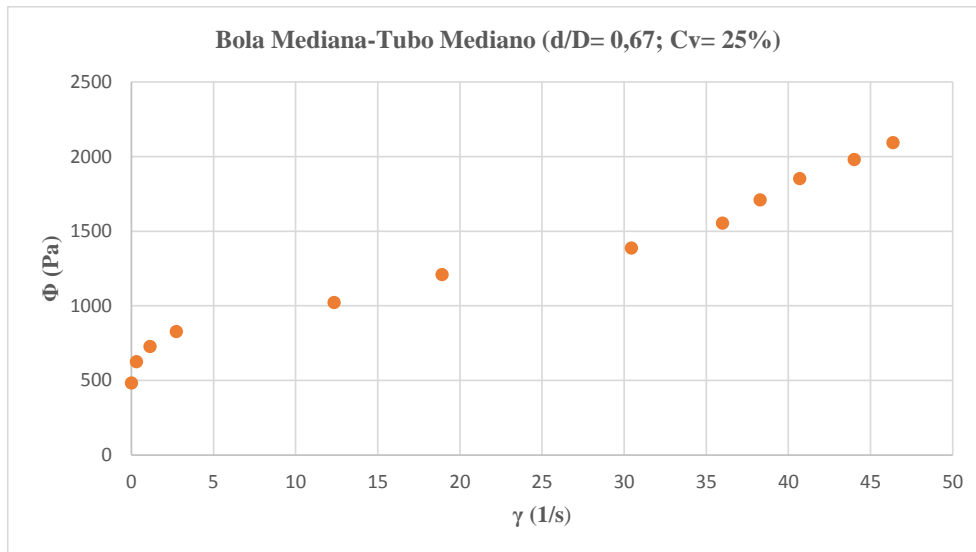


Gráfico 4.3. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 25 %

Pudo notarse que el parámetro de corte equivalente fue mayor a medida que aumentó la tasa de deformación equivalente, de manera similar en cada una de las concentraciones. Asimismo, se observó una mayor velocidad promedio de la esfera a medida que la concentración fue más baja, para los mismos ángulos de inclinación. De esta manera, la concentración de 25% presentó un rango de tasas de deformación más limitado que las concentraciones anteriores.

4.6.1.1 Calibración del reómetro de bola rodante ($d/D=0,67$)

Según el procedimiento descrito por Briscoe, Luckham y Ren (1991), se realizó la calibración del reómetro de bola rodante, comparando los resultados obtenidos con las mediciones reológicas de Caolín a 15%, 20% y 25% efectuadas por el Prof. Phillipe Coussot.

Los datos obtenidos se ajustaron a un Modelo de Herchel-Bulkley (el modelo reológico más general, a su vez utilizado por Coussot), calculando cada uno de los parámetros reológicos de dicho modelo a diferentes concentraciones.

Así, el valor del esfuerzo de cedencia, consistencia e índice n de Herschel-Bulkley, una vez realizada la calibración, resultó como se muestra en la Tabla 4.7, Tabla 4.8 y Tabla 4.9, respectivamente.

Tabla 4.7. Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola mediana -Tubo mediano

Bola Mediana-Tubo Mediano (d/ D= 0,67)				
Concentración (%)	k1 τ_c	τ_c (Coussot) (Pa)	k1	τ_c (Pa)
15	43,076	5,5	7,832	4,772
20	192,045	20	9,602	21,273
35	482,420	50	9,648	53,439
			9,028	

Tabla 4.8. Calibración de la consistencia para Bola mediana -Tubo mediano

Bola Mediana-Tubo Mediano (d/ D= 0,67)				
Concentración (%)	k2 K	K (Coussot)	k2	K
15	4,646	4,53	1,0255	6,376
20	6,858	11,28	0,6080	9,413
25	21,000	38,03	0,5522	28,824
			0,7286	

Tabla 4.9. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola mediana -Tubo mediano

Bola Mediana-Tubo Mediano (d/ D= 0,67)				
Concentración (%)	k3 n	n (Coussot)	k3	n
15	1,358	0,263	5,163	0,270
20	1,283	0,221	5,807	0,255
25	1,088	0,263	4,138	0,216
			5,036	

Puede notarse que los valores obtenidos correspondientes al esfuerzo de cedencia, el índice de consistencia y el índice n de fluidos de Herschel-Bulkley presentaron leves variaciones con respecto a los valores de Coussot.

4.6.1.2 Comparación entre los resultados obtenidos ($d/D=0,67$) y los datos reométricos de Coussot

Una vez calibrado el instrumento, se efectuaron comparaciones entre los datos obtenidos y los utilizados para calibrar (Coussot), como se muestra para en el Gráfico 4.4, Gráfico 4.5, Gráfico 4.6, Gráfico 4.7, Gráfico 4.8 y Gráfico 4.9, para cada concentración:

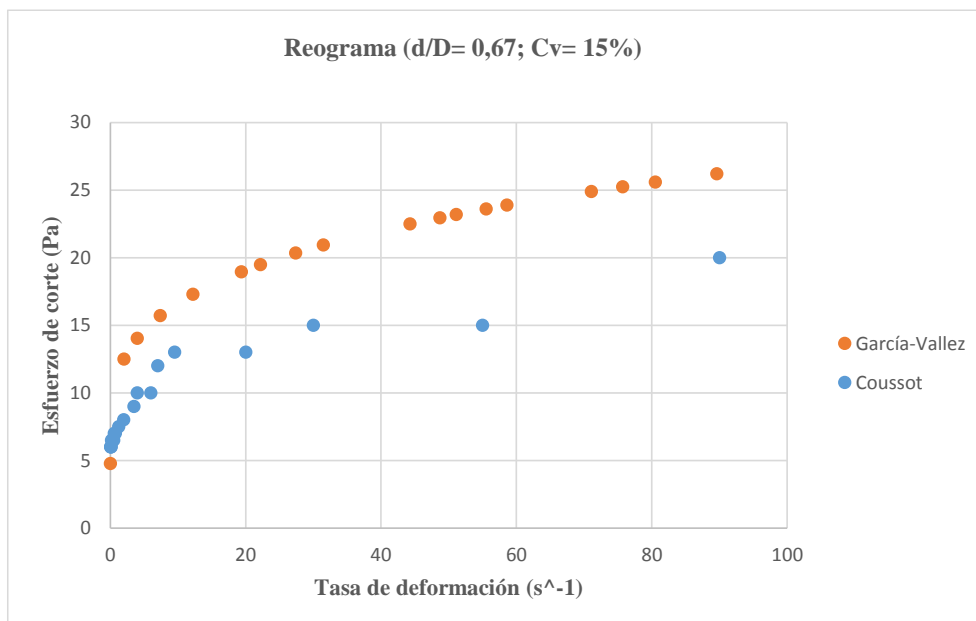


Gráfico 4.4. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 15 %

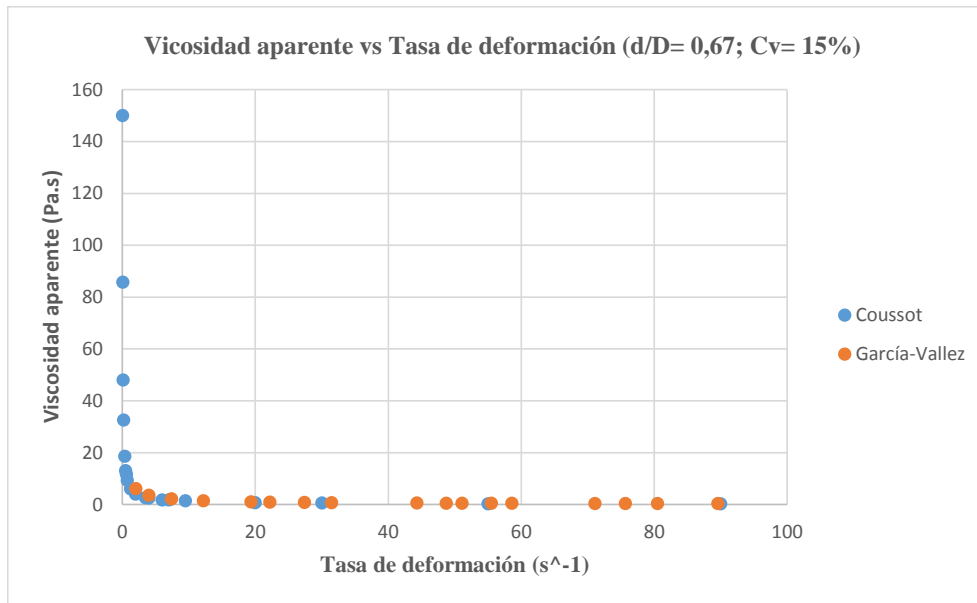


Gráfico 4.5. Comparación entre la curva “Viscosidad aparente vs Tasa de deformación” obtenida para bola mediana y tubo mediano y la realizada por Coussot, con una concentración en volumen de 15 %

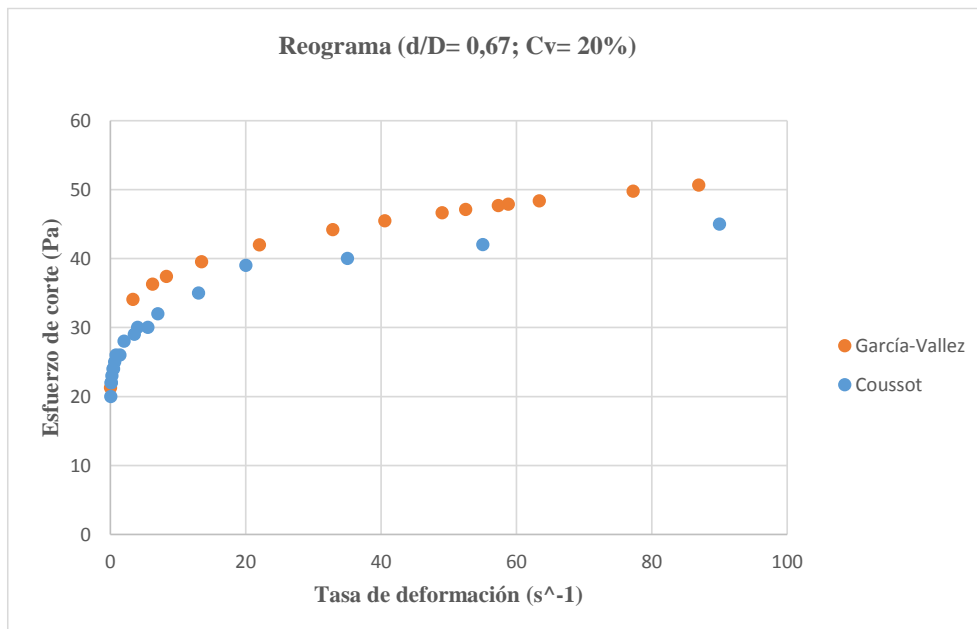


Gráfico 4.6. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%

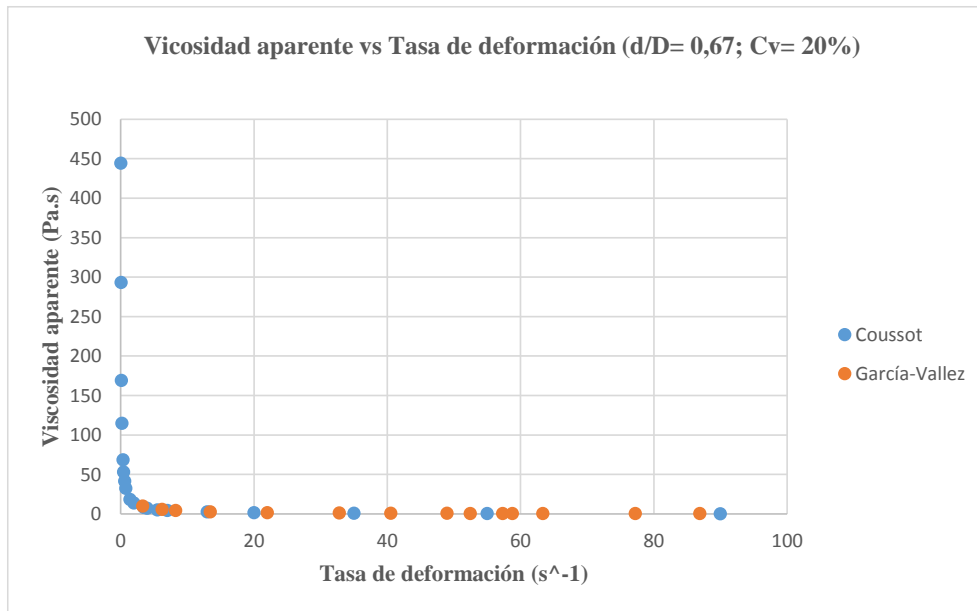


Gráfico 4.7. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%

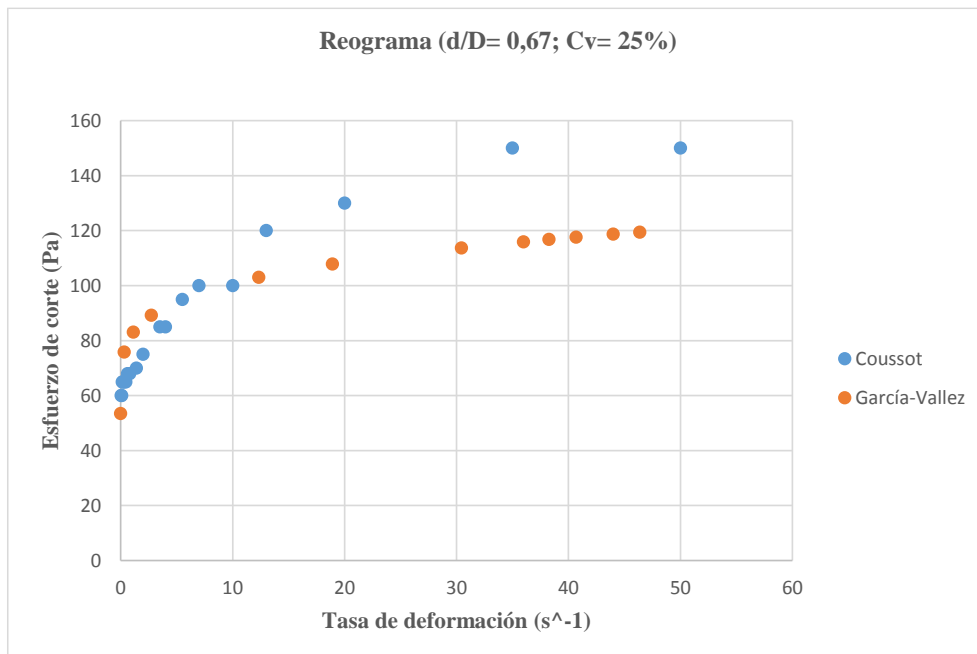


Gráfico 4.8. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 25%

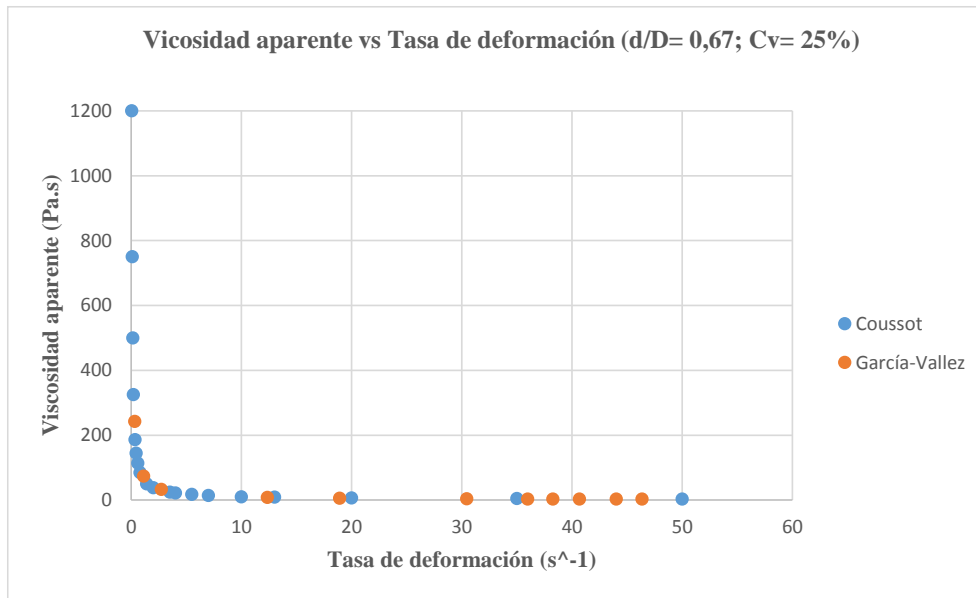


Gráfico 4 9. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola mediana y tubo mediano con una concentración en volumen de 25%

Al realizar una comparación entre las curvas obtenidas y las curvas de Coussot para la concentración de 15%, se pudo notar que las mismas presentan un comportamiento similar, fundamentalmente a bajas tasas de deformación (aun cuando Coussot presenta un conjunto de puntos mayor en esta zona). A medida que se aumentó la tasa de deformación, la diferencia entre las curvas resulta levemente mayor, ubicándose los valores de esfuerzo cortante obtenidos por encima de los de Coussot.

El comportamiento reológico obtenido con la concentración de 20% fue la que más se aproximó al descrito por Coussot para esta relación de diámetros. De esta manera, las curvas fueron bastante cercanas, tanto a bajas como a altas tasas de deformación.

En la concentración de 25%, la curva obtenida se mostró cercana a la Coussot en bajas tasas de deformación (aproximadamente hasta 10 s⁻¹). En

valores altos presentó un comportamiento más distante, ubicándose por debajo de la curva de referencia.

Comparando las gráficas de viscosidad aparente contra las tasas de deformación pudo observarse bastante similitud, cumpliendo con el comportamiento esperado para este tipo de fluido, el cual a bajas tasas de deformación presenta una alta viscosidad. A medida que la tasa de deformación aumenta, la viscosidad disminuye. Asimismo, la viscosidad creció con la concentración.

4.6.2 Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,83$

Con esta relación de diámetros se efectuaron ensayos en concentraciones de 15% y 20%. Se realizó el mismo procedimiento que el efectuado con la configuración geométrica anterior (véase Gráfico 4.10 y Gráfico 4.11).

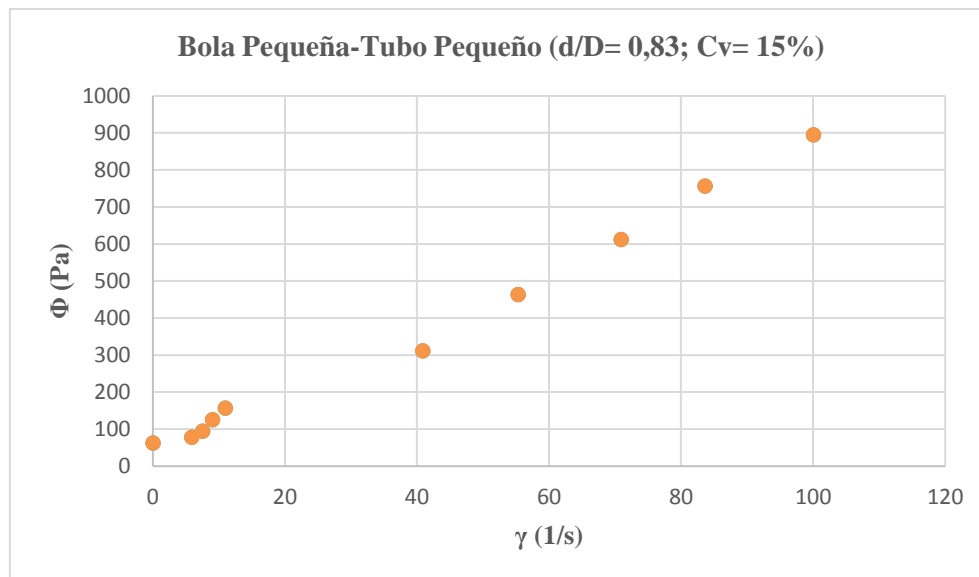


Gráfico 4.10. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 15 %

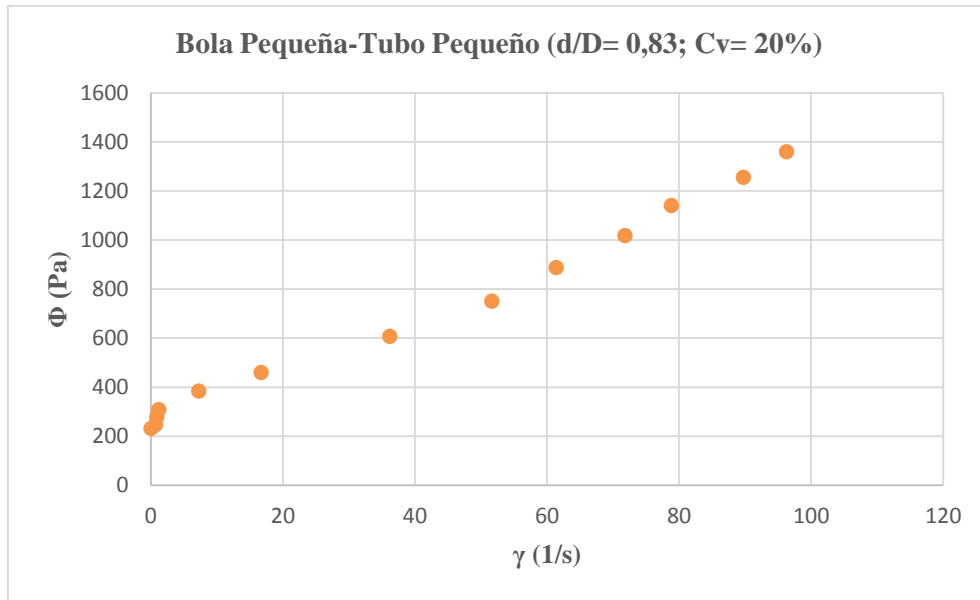


Gráfico 4. 11. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 20%

Se pudo observar que el parámetro de corte equivalente aumentó con la tasa de deformación equivalente para ambas concentraciones. De manera similar a la configuración geométrica anterior, la velocidad promedio disminuyó con el aumento de la concentración.

4.6.2.1 Calibración del reómetro de bola rodante (d/D=0,83)

Los valores referentes al esfuerzo de cedencia se muestran a continuación (véase Tabla 4.10):

Tabla 4.10 . Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola pequeña -Tubo pequeño

Bola Pequeña-Tubo Pequeño (d/D= 0,83)				
Concentración (%)	k1 τ_c	τ_c (Cousot) (Pa)	k1	τ_c (Pa)
15	62,429	5,5	11,351	5,444
20	231,659	20	11,583	20,202
			11,467	

De igual manera, los respectivos índices de consistencia fueron los siguientes (véase *Tabla 4.11*):

Tabla 4.11. Calibración de la consistencia para Bola pequeña -Tubo pequeño

Bola Pequeña-Tubo Pequeño (d/D= 0,83)				
Concentración (%)	k2 K	K (Coussot)	k2	K
15	2,325	4,53	0,513	4,949
20	4,809	11,28	0,426	10,237
			0,470	

A su vez, los valores para el índice n de Herchel-Bulkley se expresaron como (véase *Tabla 4.12*):

Tabla 4.12. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola pequeña -Tubo pequeño

Bola Pequeña-Tubo Pequeño (d/D= 0,83)				
Concentración (%)	k3 n	n (Coussot)	k3	n
15	1,277	0,263	4,857	0,250
20	1,182	0,221	5,350	0,232
			5,103	

Se pudo observar que el esfuerzo de cedencia, el índice de consistencia y el índice n de Herschel-Bulkley se acercaron, en gran medida, a los valores de Coussot, lo que permite deducir la efectividad de la calibración efectuada.

4.6.2.2 Comparación entre los resultados obtenidos (d/D=0,83) y los datos reométricos de Coussot

Las comparaciones entre los datos obtenidos y la curva de referencia (Coussot), se muestra en el Gráfico 4.12, Gráfico 4.13, Gráfico 4.14 y Gráfico 4.15, para cada concentración:

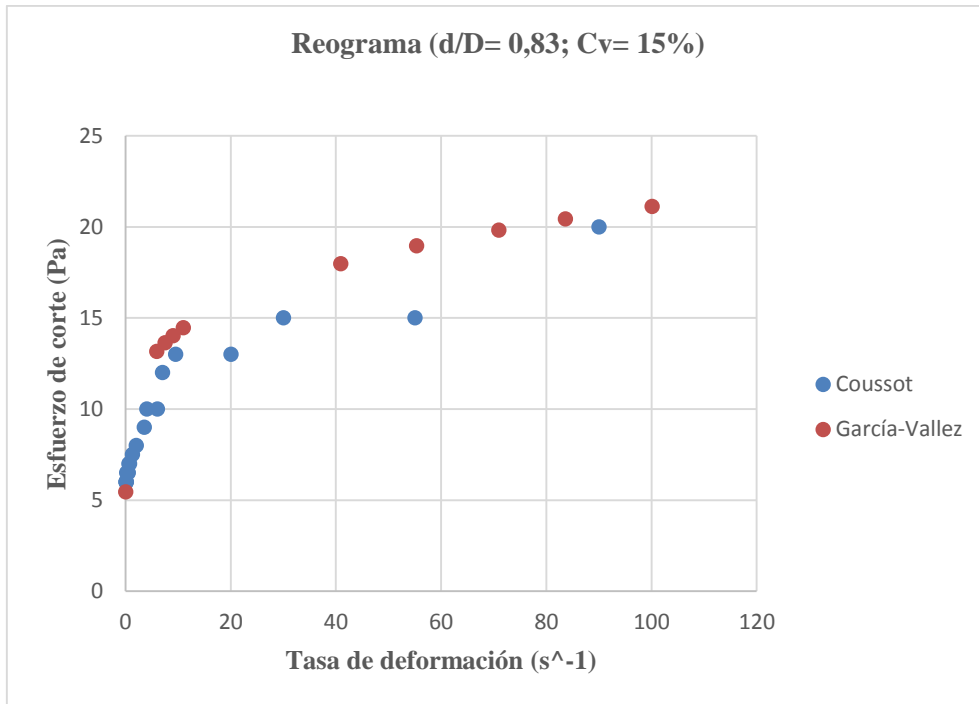


Gráfico 4.12. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 15%

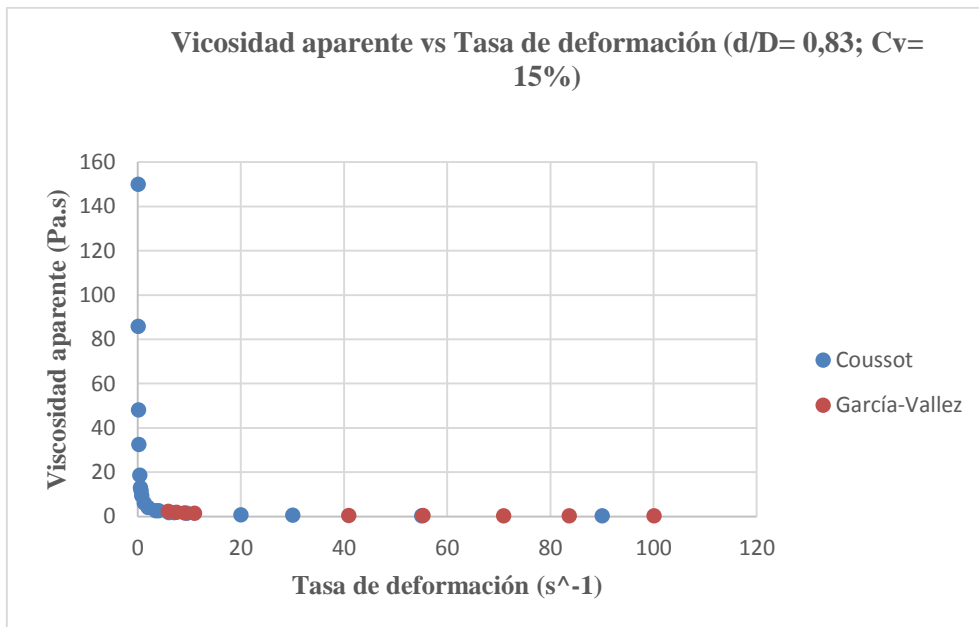


Gráfico 4.13. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 15%

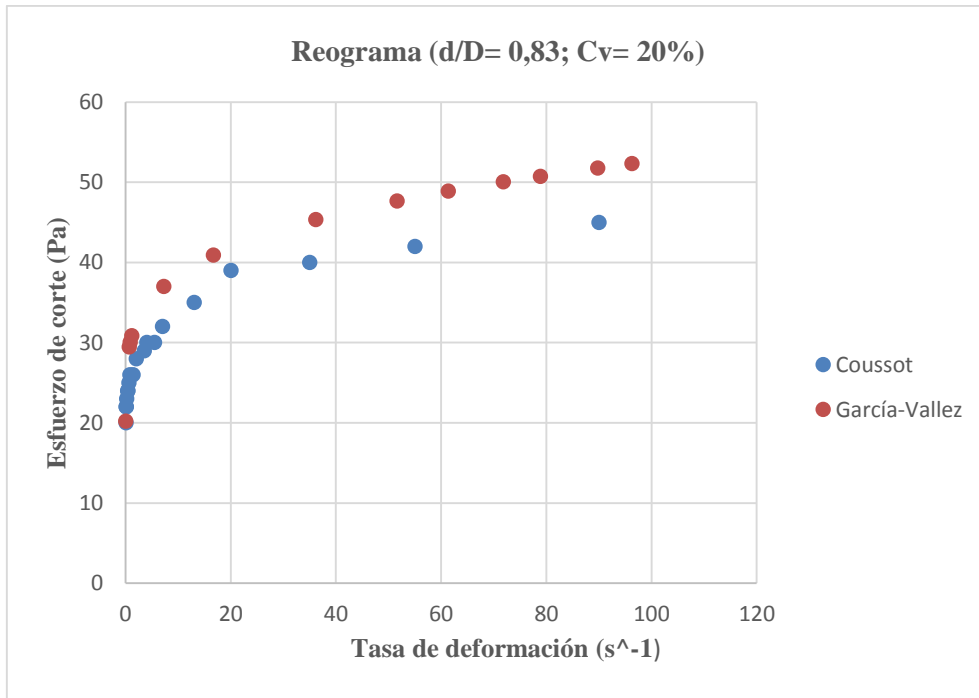


Gráfico 4.14. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 20%

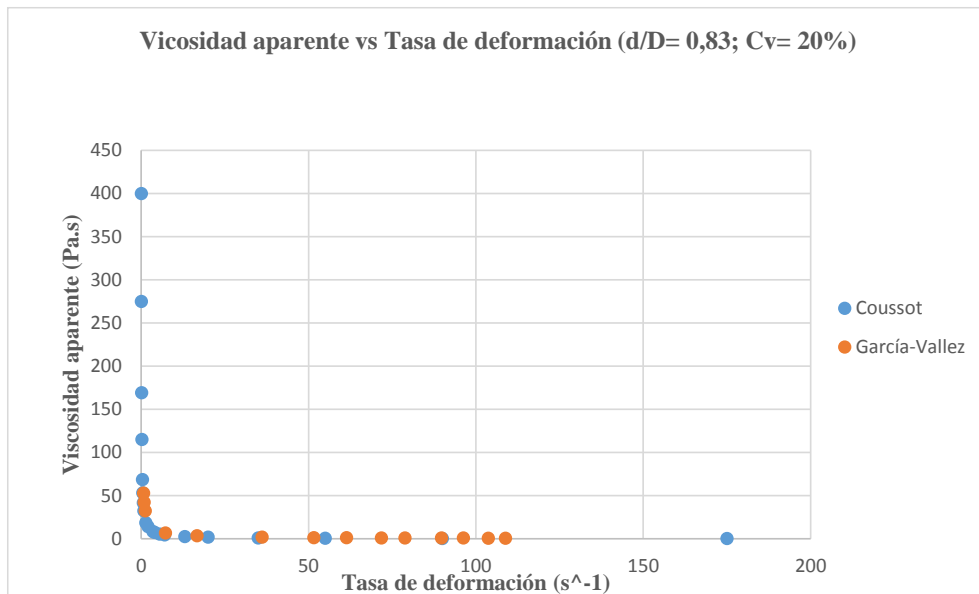


Gráfico 4.15. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo pequeño con una concentración en volumen de 20%

Pudo notarse que el reograma para la concentración de 15% presentó un comportamiento cercano al descrito por el reograma de Coussot, para todo el rango de tasas de deformación ensayadas.

De manera similar, en la concentración de 20% las curvas obtenidas se aproximaron, en gran medida, a las de Coussot, tanto para bajas como altas tasas de deformación

Los resultados obtenidos son satisfactorios en ambas concentraciones, lo cual permite deducir que el instrumento está bien calibrado.

Por su parte, las gráficas de viscosidad aparente contra tasas de deformación se comportaron según la naturaleza del fluido. Se pudo notar alta viscosidad a bajas tasas de deformación. Asimismo, con el aumento de la concentración la viscosidad aumentó.

4.6.3 Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,46$

Con esta relación de diámetro se realizaron pruebas en una única concentración de 20%, donde se obtuvo el Gráfico 4.16. Al realizar la calibración con un procedimiento análogo, se obtuvo los parámetros reológicos que se indican en la Tabla 4.13, Tabla 4.14 y Tabla 4.15

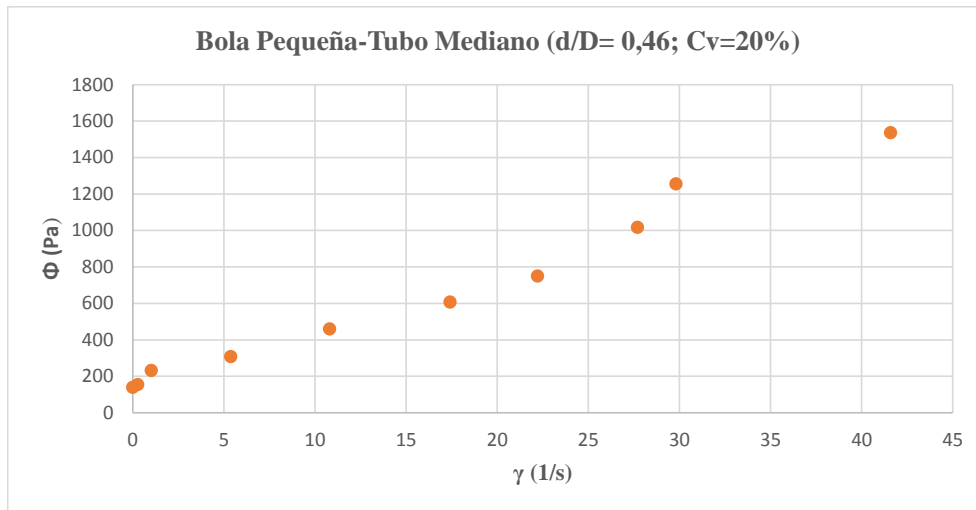


Gráfico 4.16. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola pequeña y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%

La gráfica del parámetro de corte equivalente vs la tasa de corte equivalente realizado con la relación de diámetros $d/D= 0,46$ resultó similar al del resto de las configuraciones geométricas. El primer parámetro aumentó siempre con el incremento del segundo.

4.6.3.1 Calibración del reómetro de bola rodante ($d/D=0,46$)

Los resultados de la calibración efectuada se muestran en la Tabla 4.13, Tabla 4.14 y Tabla 4.15.

Tabla 4.13. Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola pequeña -Tubo mediano

Bola Pequeña-Tubo Mediano ($d/D= 0,46$)				
Concentración (%)	k1 τ_c	τ_c (Cousot) (Pa)	k1	τ_c (Pa)
20	139,250	20	6,962	20
			6,962	

Tabla 4.14. Calibración de la consistencia para Bola pequeña -Tubo mediano

Bola Pequeña-Tubo Mediano (d/D= 0,46)				
Concentración (%)	k2 K	K (Coussot)	k2	K
20	15,431	11,28	1,368	11,28
			1,368	

Tabla 4.15. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola pequeña -Tubo mediano

Bola Pequeña-Tubo Mediano (d/D= 0,46)				
Concentración (%)	k3 n	n (Coussot)	k3	n
20	1,211	0,221	5,479	0,221
			5,479	

La calibración del reómetro con esta configuración se hizo a partir de los datos de Coussot únicamente para la concentración de 20%. De esta manera, los valores de los parámetros reológicos obtenidos fueron adaptados completamente a los de la curva de referencia. La calibración efectuada aplicará solo para esta concentración.

4.6.3.2 Comparación entre los resultados obtenidos (d/D=0,46) y los datos reométricos de Coussot

Al realizar una comparación entre la curva obtenida y la de referencia se obtuvo el Gráfico 4.17 y Gráfico 4.18.

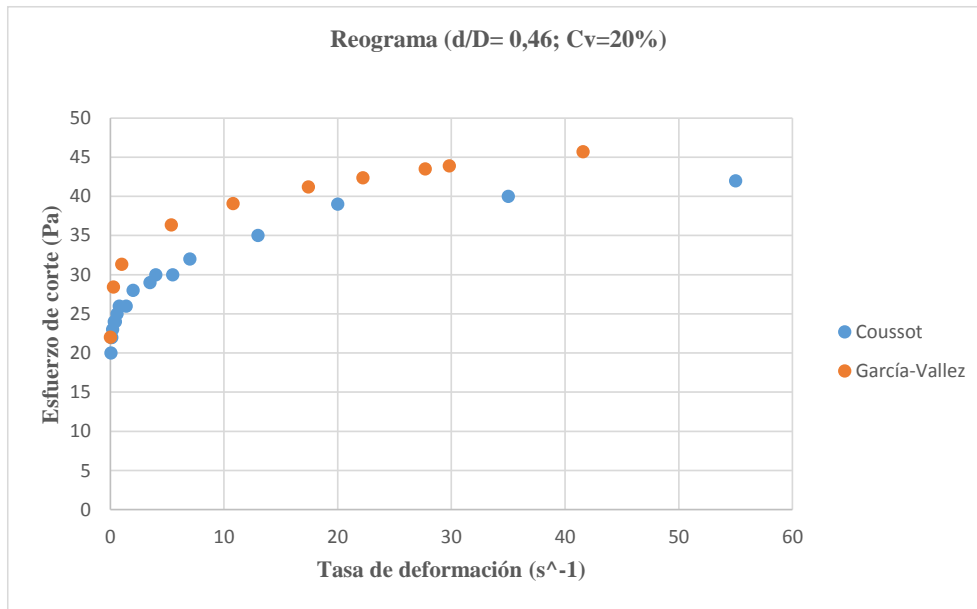


Gráfico 4.17. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%

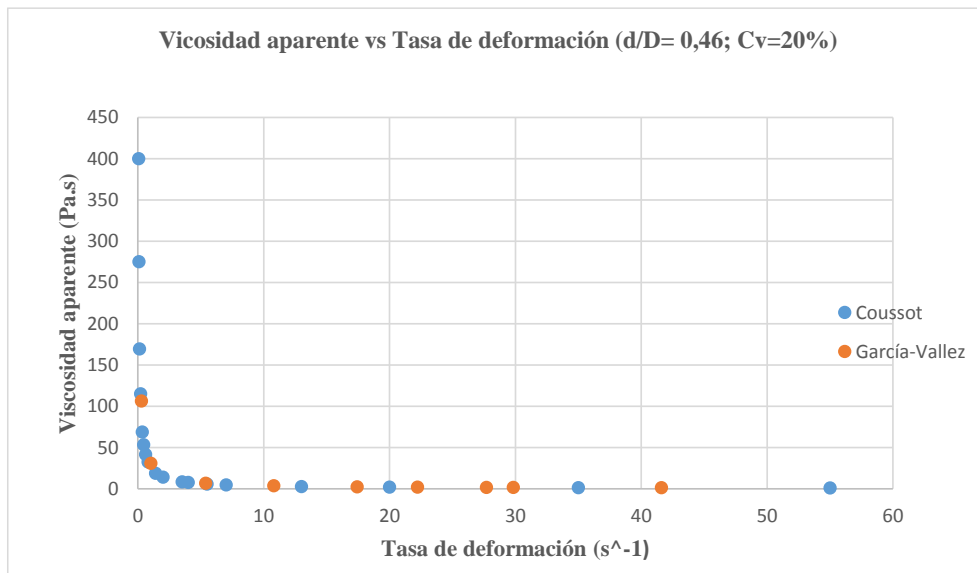


Gráfico 4.18. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola pequeña y tubo mediano con una concentración en volumen de 20%

El reograma obtenido se aproximó notablemente al de Coussot. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la calibración efectuada para esta relación

de diámetros solo considera a la concentración de 20%, por lo que dicha aproximación pudiera estar sujeta a errores.

La grafica de viscosidad aparente contra tasas de deformación presentó un comportamiento de acuerdo a lo esperado.

4.6.4 Reómetro de relación de diámetros $d/D=0,89$

Al igual que en la relación de diámetros $d/D=0,46$ se ensayó únicamente la concentración $C_v=20\%$ (véase *Gráfico 4.19*). Los parámetros reológicos obtenidos se indican en la Tabla 4.16, Tabla 4.17 y Tabla 4.18.

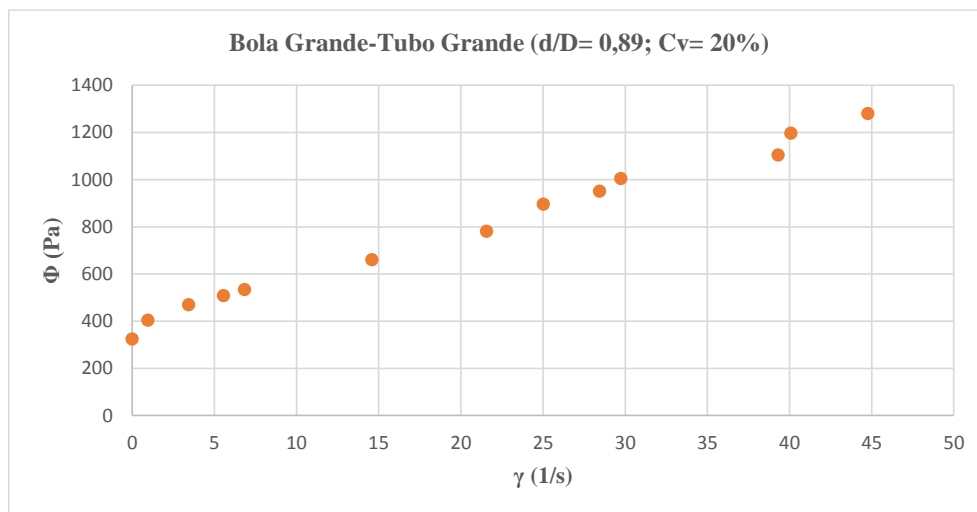


Gráfico 4.19. Parámetro de esfuerzo de corte equivalente vs Tasa de deformación equivalente para bola grande y tubo grande con una concentración en volumen de 20%

Pudo verificarse que el esfuerzo de corte equivalente contra la tasa de deformación en el reómetro de relación de diámetros $d/D= 0,89$ presenta un comportamiento similar al resto de las curvas del mismo tipo. El esfuerzo de corte aumenta al incrementarse la tasa de deformación.

4.6.4.1 Calibración del reómetro de bola rodante
($d/D=0,89$)

La calibración efectuada se resume en el contenido de la Tabla 4.16, Tabla 4.17 y Tabla 4.18:

Tabla 4.16. Calibración del esfuerzo de cedencia para Bola grande -Tubo grande

Bola Grande-Tubo Grande ($d/ D= 0,89$)				
Concentración (%)	k1 τ_c	τ_c (Coussot) (Pa)	k1	τ_c (Pa)
20	325,122	20	16,256	20
			16,256	

Tabla 4.17. Calibración de la consistencia para Bola mediana -Tubo mediano

Bola Grande-Tubo Grande ($d/ D= 0,89$)				
Concentración (%)	k2 K	K (Coussot)	k2	K
20	27,447	11,28	2,433	11,28
			2,433	

Tabla 4.18. Calibración del índice n de Herschel-Bulkley para Bola grande -Tubo grande

Bola Grande-Tubo Grande ($d/ D= 0,89$)				
Concentración (%)	k3 n	n (Coussot)	k3	n
20	0,917	0,221	4,151	0,221
			4,151	

4.6.4.2 Comparación entre los resultados obtenidos
($d/D=0,89$) y los datos reométricos de Coussot

Al comparar la curva obtenida y la de Coussot se obtuvo el Gráfico 4.20 y Gráfico 4.21.

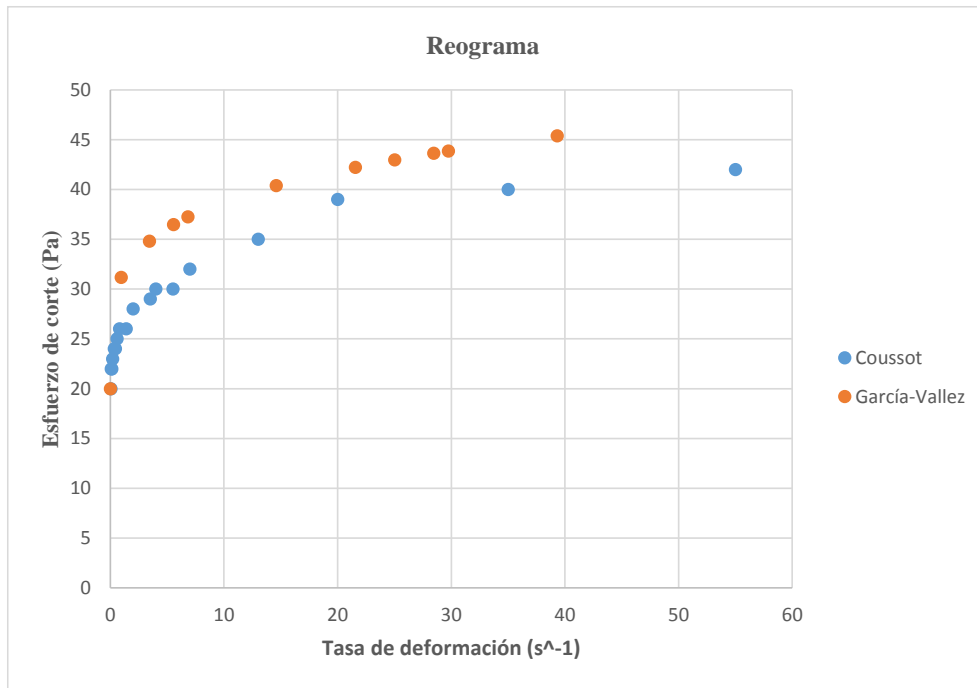


Gráfico 4.20. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola grande y tubo grande con una concentración en volumen de 20%

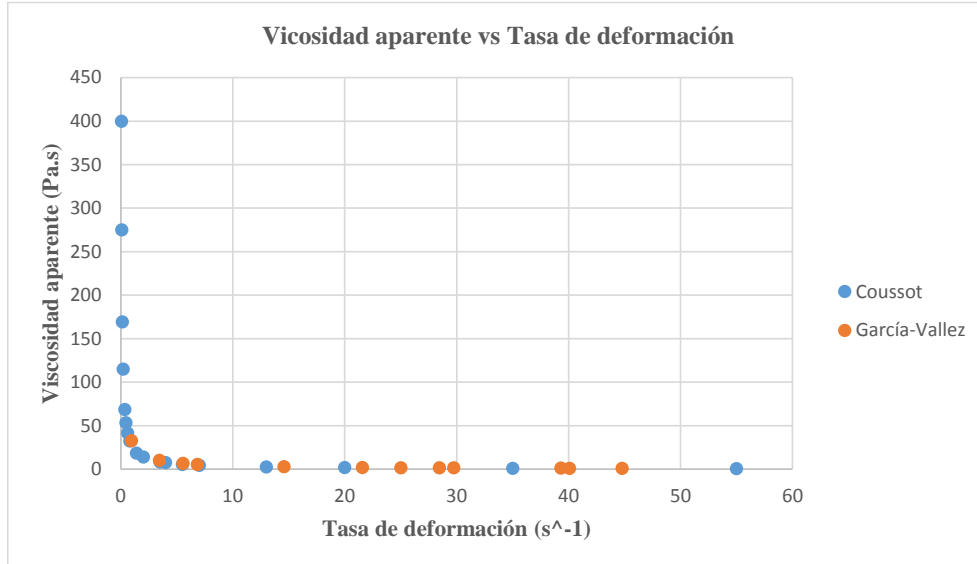


Gráfico 4.21. Comparación entre la curva reológica obtenida y la realizada por Coussot para bola grande y tubo grande con una concentración en volumen de 20%

En el reograma obtenido se puede observar que para tasas de deformación similares los esfuerzos de corte presentaron valores cercanos a los descritos por

Coussot, presentando leves variaciones a lo largo de toda la curva. Al igual que la relación de diámetros $d/D=0,46$, la calibración del reómetro con esta configuración geométrica se hizo únicamente con la concentración de 20%, lo cual puede inducir algunos errores en la caracterización real del fenómeno si se ensayan concentraciones distintas con esta relación de diámetros.

La curva de viscosidad aparente contra tasas de deformación mostró un comportamiento similar al resto de las gráficas.

4.7 INCERTIDUMBRE POR REPETIBILIDAD

Los valores de incertidumbre por repetibilidad de las mediciones tomadas de velocidad de caída de la bola, según la relación de diámetros y concentración están dados en la Tabla 4.19:

Tabla 4.19. Incertidumbre por repetibilidad según la relación de diámetros y la concentración

d/D	Concentración	Incertidumbre por repetibilidad
0,46	20	0,0135
0,67	15	0,0067
	20	0,0078
	25	0,0048
0,83	15	0,0019
	20	0,0013
0,89	20	0,0009

La incertidumbre por repetibilidad es aceptable, aun realizando el mínimo de repeticiones admisible. Sin embargo, es pertinente realizar un mayor número de pruebas, fundamentalmente a bajas tasas de deformación, donde la velocidad de caída de la bola es muy baja y tienden a existir errores.

4.8 CONSIDERACIONES GENERALES DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para deducir la curva que mejor se aproximó a la curva de referencia, en cada concentración, según la relación de diámetros, se procedió a calcular un parámetro comparativo de error denominado error de la desviación media cuadrática (RMSE). En la Tabla 4.20, se muestran los distintos valores:

Tabla 4.20. Valores de error de la desviación media cuadrática (RMSE) según relación de diámetros

ERROR DE LA DESVIACIÓN MEDIA CUADRÁTICA (RMSE)		
Relación de diámetros (d/D)	Concentración (%)	RMSE
0,46	20	0,16
0,67	15	4,31
	20	0,48
	25	25,15
0,83	15	0,41
	20	0,75
0,89	20	0,18

Se puede observar que para la concentración de 15%, la relación de diámetros que presentó mejores resultados fue la correspondiente a $d/D=0,83$, debido a que el error asociado a la desviación media cuadrática (RMSE) fue menor. Para la misma concentración, la configuración geométrica $d/D=0,67$ presentó un RMSE considerablemente mayor.

Por su parte, para la concentración de 20%, los reómetros con relaciones de diámetro $d/D=0,46$ y $d/D=0,89$ presentaron los valores de RMSE más reducidos. Lo anterior se debe a que dichos instrumentos fueron calibrados de acuerdo a dicha concentración. La relación de diámetros $d/D=0,67$ se aproximó con considerable precisión, al igual que la relación equivalente a $d/D=0,83$

En la concentración de 25%, la relación $d/D=0,67$ proporcionó resultados que presentaron un RMSE considerable, presentando un comportamiento distinto al de Coussot, fundamentalmente a altas tasas de deformación. Sin embargo, a bajas tasas de deformación los resultados son aceptables.

En base a lo anterior, puede considerarse que el reómetro con la relación de diámetros correspondiente a $d/D=0,83$ es el más adecuado para trabajar en el rango de concentraciones entre 15% y 20%, ya que fue calibrado utilizando ambas concentraciones y presenta un RMSE diminuto. Su limitación radica en la imposibilidad de trabajar en concentraciones por encima de este rango. Por su parte, la relación $d/D=0,67$ puede utilizarse para la caracterización de mezclas con concentraciones de 25% solo a bajas tasas de deformación.

Los resultados obtenidos permiten verificar la validez del rango de relaciones de diámetro propuesto por Briscoe, Luckham y Ren (1991). El rango propuesto por Hasan (1986), quien propone relaciones de diámetros mayores a 0,707, tuvo validez para concentraciones entre 15% y 20%.

4.9 SIMULACIÓN NUMÉRICA

4.9.1 Convergencia de Malla

El estudio de convergencia se realizó comparando 3 mallas cuyas características se muestran en la Tabla 4 21.

Tabla 4.21. Configuración de Mallas

Tabla de convergencia de Malla			
Parámetro	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3
Tamaño Máximo del elemento (mm)	100,45	40,026	20,654
Tamaño Mínimo del elemento (mm)	2,564	0,20013	0,0267
Número Total de elementos	30765	68981	100678
Número Total de Nodos	5986	20405	70467
Tiempo de Resolución	30 min	50 min	2 h: 3 min

Los resultados de la velocidad de la esfera obtenidos con las diferentes mallas, simulando una inclinación de 5° con la concentración de 15%, se muestran en la Gráfica 4.22

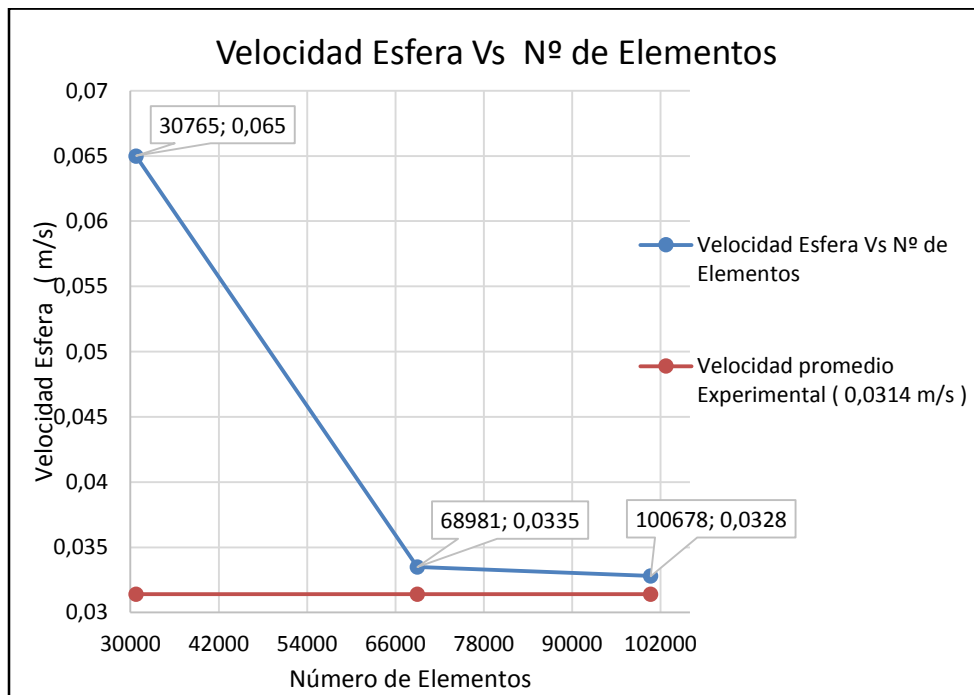


Gráfico 4.22. Convergencia de Malla

De la Tabla 4.20 y el Gráfico 4.22 se pudo observar que la Malla 2 presentó una mejora cuantitativa con respecto a la Malla 1, la cual se alejó considerablemente del valor de la velocidad obtenido de forma experimental. Con respecto a la Malla 3, se observa que, pese a tener mayor número de elementos (mayor refinación), los resultados que arrojó no variaron significativamente de los obtenidos con la Malla 2. Por último, también se observa que la Malla 2 tuvo un tiempo de computo mucho menor que la Malla 3.

De lo anterior se puede señalar que la malla más eficiente fue la Malla 2, la cual fue utilizada para realizar las simulaciones ya que arrojó los resultados más cercanos a los obtenidos experimentalmente, utilizando un tiempo de computo menor.

En las Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3, se muestran algunas vistas de la malla seleccionada.

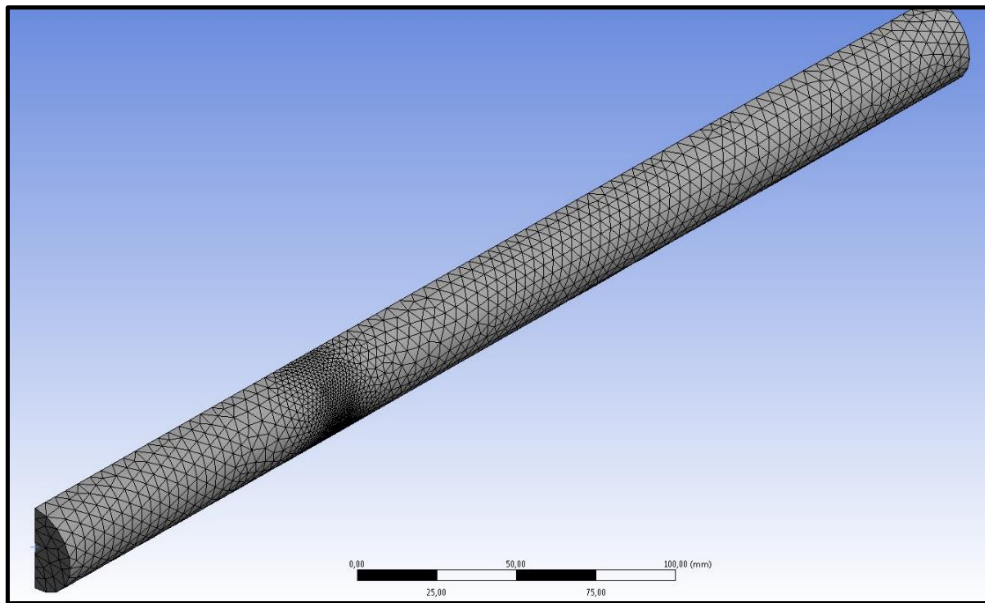


Figura 4.1. Vista Isométrica de la Malla seleccionada

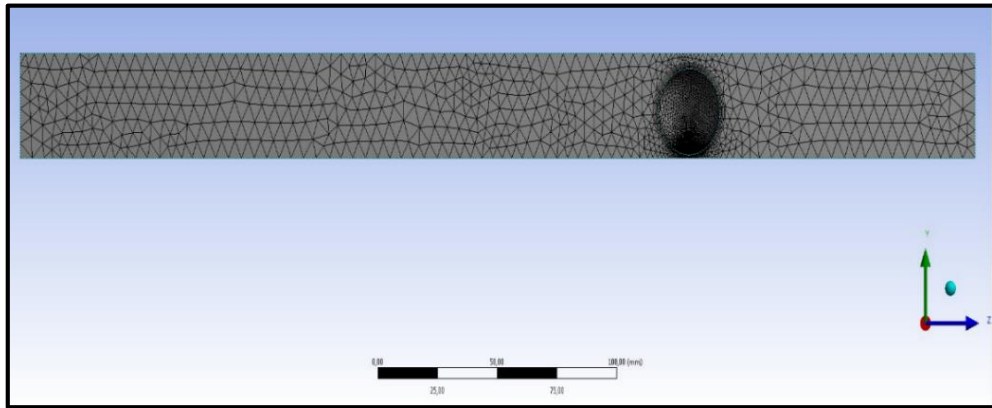


Figura 4.2. Vista frontal de la Malla seleccionada

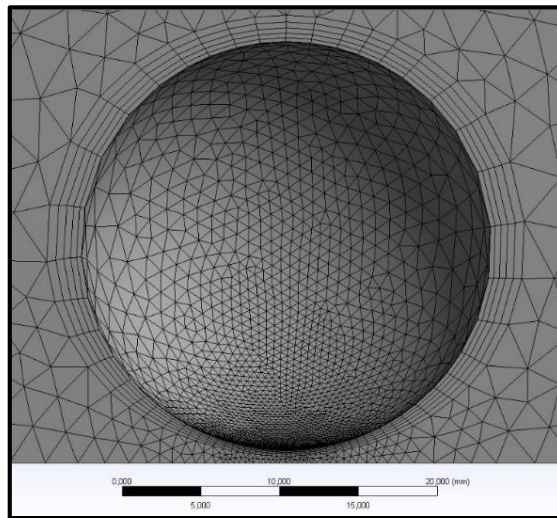


Figura 4.3. Vista Frontal del Método “Inflation” aplicado alrededor de la esfera

4.9.2 Inicio del movimiento de la esfera

Como se enunció anteriormente, se simuló la esfera con relación de diámetros $d/D=0,83$ en una concentración de 15%. En dicha configuración, el ángulo correspondiente al esfuerzo de cedencia obtenido experimentalmente fue de 2° . Por su parte, numéricamente se pudo lograr el movimiento a partir del ángulo $3,25^\circ$. Esta diferencia es consecuencia de las simplificaciones consideradas en el momento de realizar la simulación. La misma se realizó en estado transitorio, eligiendo como Paso de Tiempo $\Delta t = 0,001$ s, procurando con ello que el número de Courant se mantuviera inferior a 10.

En la Gráfica 4.23, Gráfica 4.24 y Gráfica 4.25 se presenta el comportamiento de las curvas de Velocidad Lineal Vs Paso de Tiempo, Aceleración Lineal Vs Paso de Tiempo y Distancia recorrida Vs Paso de Tiempo, respectivamente.

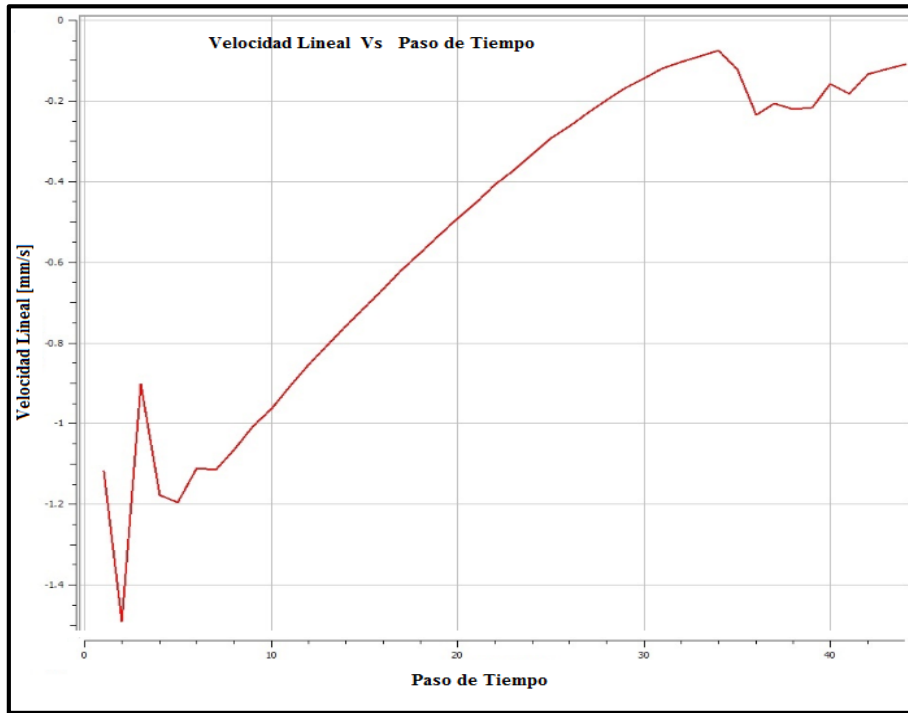


Gráfico 4.23. Cambio de la velocidad lineal de la esfera [mm/s] Vs Paso de Tiempo

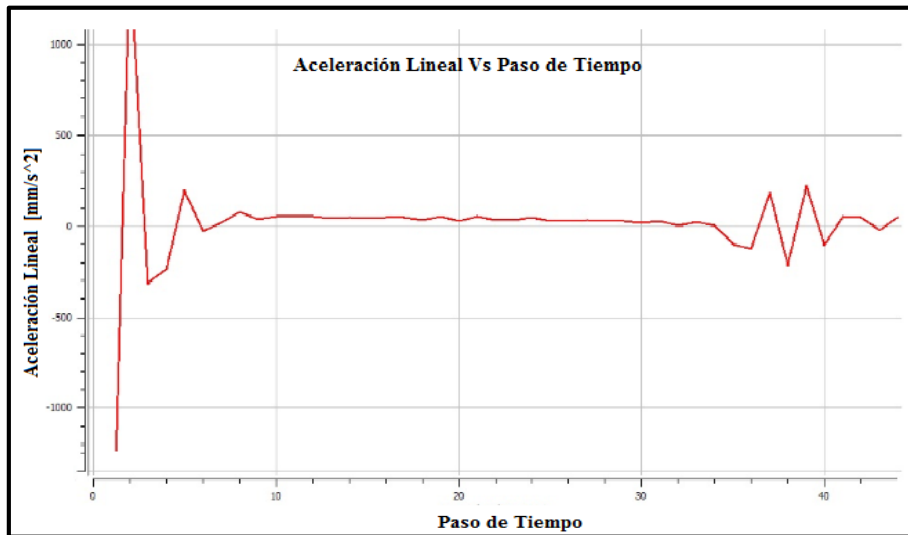


Gráfico 4.24. Aceleración lineal [mm/s^2] Vs Paso de Tiempo

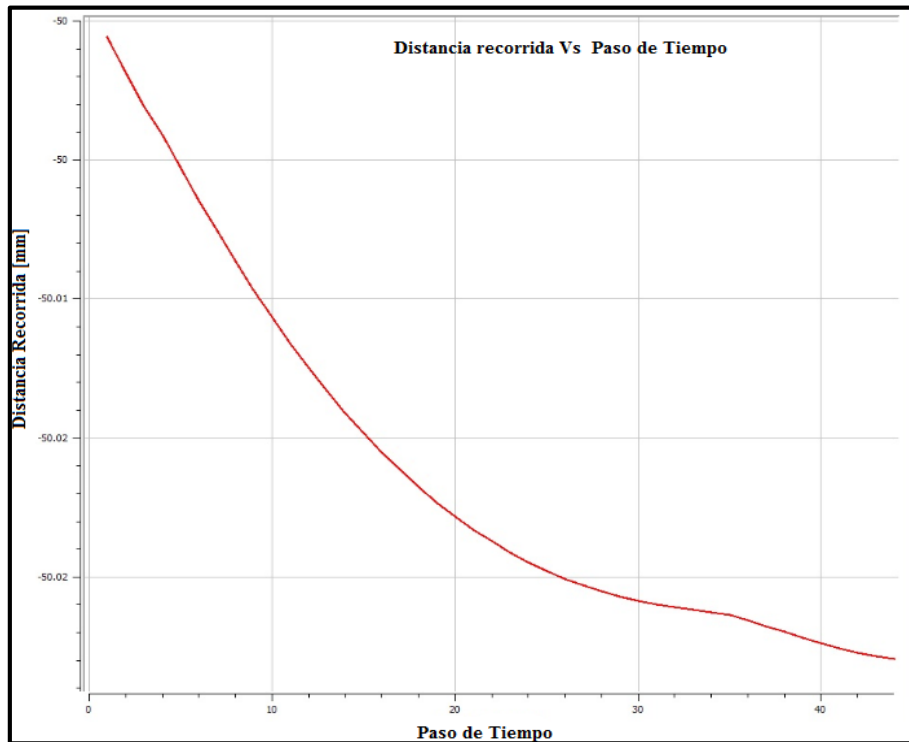


Gráfico 4.25. Distancia Recorrida [mm] Vs Paso de Tiempo

Se observó una inestabilidad inicial en la convergencia de las curvas de Velocidad Lineal y Aceleración Lineal, la cual se atenúa a medida que transcurren los Pasos de Tiempo. Dicha inestabilidad es normal y se debe al comienzo del cálculo del método de volúmenes finitos. Luego se presenta un tramo de curva suave (desde $\Delta t = 0,010$ s hasta $\Delta t = 0,033$ s). Posteriormente, en el Paso de Tiempo $\Delta t = 0,034$ s, se vuelve a presentar una inestabilidad, la cual si representa una anomalía, ya que contradice el fenómeno real. La esfera, al estar rodando a lo largo del tubo inclinado debe ir aumentando su velocidad a medida que va disminuyendo la aceleración (como se puede notar en la zona de curva suave), hasta adquirir una velocidad constante y una aceleración igual a $0 \frac{mm}{s^2}$. Por el contrario, se observa que, justo cuando la aceleración tiende a $0 \frac{mm}{s^2}$ y se alcanza velocidad constante (alrededor de $0,1 \frac{mm}{s}$), la esfera comenzó a presentar cambios de velocidad y aceleración bruscos y alternantes (aceleración

y desaceleración). En la Figura 4.25, se puede observar que, antes del Paso de Tiempo $\Delta t = 0,034$ s, la curva de desplazamiento de la esfera fue tendiendo a una recta horizontal; lo cual indica que, aunque la esfera no se detuvo, continuó su cambio de posición de forma muy lenta.

Pudo notarse que, para el Paso de Tiempo $\Delta t = 0,034$ s, la esfera alcanzó una velocidad constante y una aceleración igual a cero (estado estacionario), lo que produjo que el método numérico de cálculo dejara de converger, debido a que la simulación se realizó en estado transitorio.

El esfuerzo de cedencia obtenido numéricamente fue de $\tau_c = 8,13$ Pa. Experimentalmente el valor conseguido fue de $\tau_c = 5,444$ Pa. La diferencia se debe a las simplificaciones realizadas inherentes a la simulación numérica.

En la Figura 4.4, se presenta la distribución de velocidades alrededor de la esfera al inicio del movimiento.

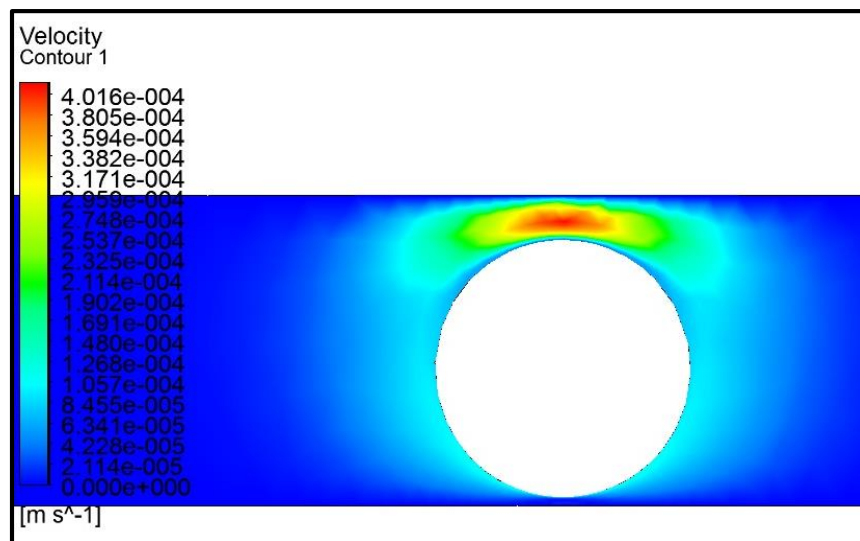


Figura 4.4. Distribución de Velocidades alrededor de la esfera en el inicio del movimiento

Se puede observar que en el momento en que la esfera inicia movimiento, el fluido se encuentra en régimen laminar y a muy bajo número de Reynolds, es decir, cumple con la Ley de Stokes.

4.9.3 Simulación del flujo desarrollado

Se procedió a simular la misma configuración (relación de diámetros $d/D=0,83$ y una concentración de 15%) para una inclinación de 45° . Con esto se pudo observar el perfil de velocidades que se forma cuando la esfera se desplaza a una alta velocidad.

En la Gráfica 4.26, la Gráfica 4.27 y la Gráfica 4.28 se describe el comportamiento de las curvas de Velocidad Lineal Vs Paso de Tiempo, Aceleración Lineal Vs Paso de Tiempo y Desplazamiento Vs Paso de Tiempo, respectivamente.

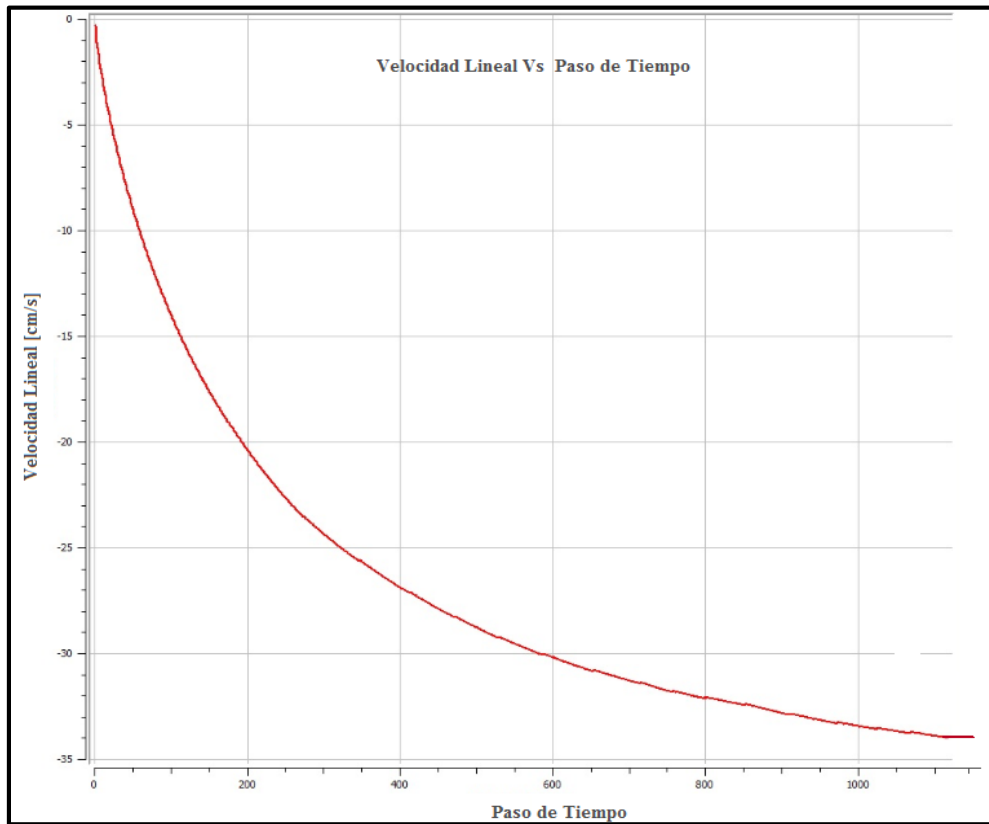


Gráfico 4.26. Velocidad lineal de la esfera [cm/s] Vs Paso de Tiempo

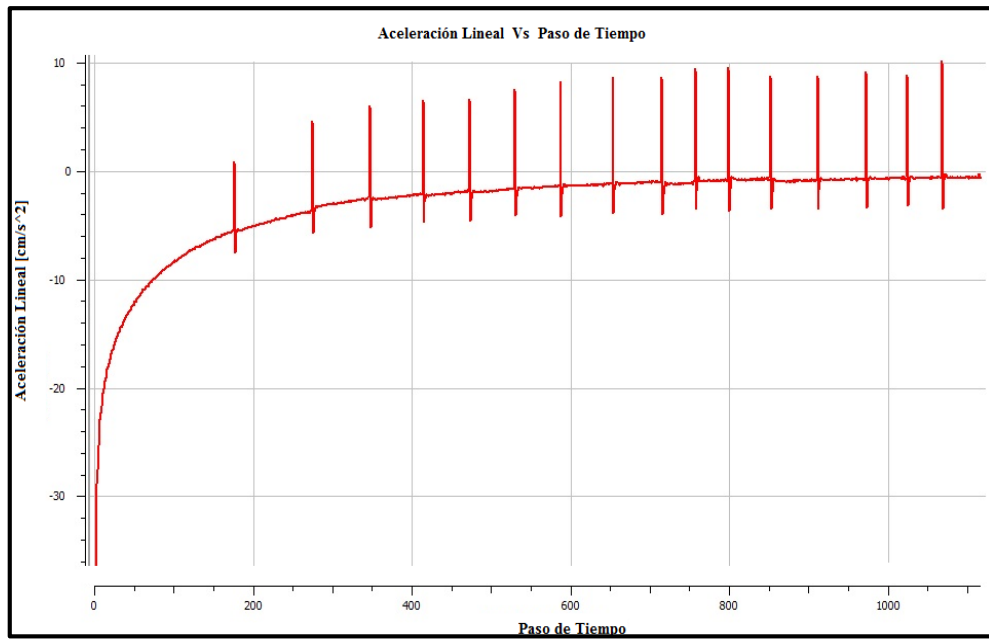


Gráfico 4.27. Aceleración Lineal [cm/s^2] Vs Paso de Tiempo

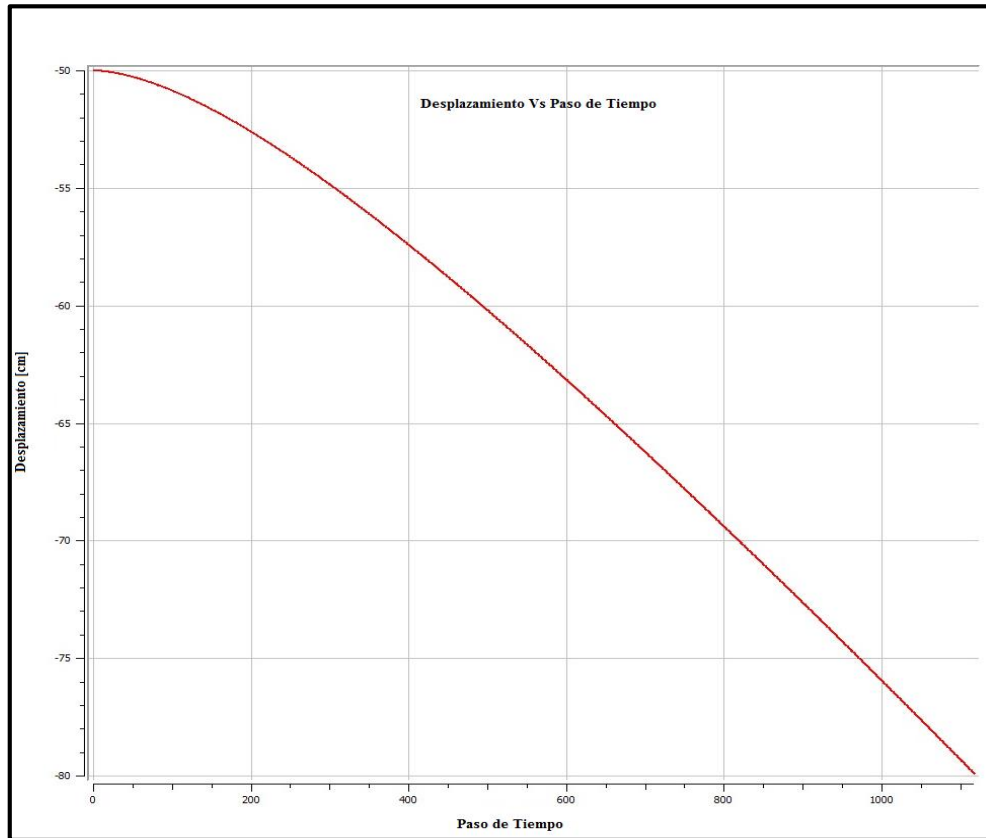


Gráfico 4.28. Desplazamiento [cm] Vs Paso de Tiempo

Analizando Gráfica 4.26, se pudo constatar que la esfera partió del reposo y aumentó su velocidad por efecto de la aceleración de la gravedad, hasta que dicha aceleración comenzó a disminuir a medida que transcurrieron los Pasos de Tiempo. Por consecuencia, la velocidad fue tendiendo a estabilizarse en el valor de $34,67 \frac{cm}{s}$. Experimentalmente, para dicha configuración, la velocidad promedio obtenida fue de $31,70 \frac{cm}{s}$.

En la Gráfica 4.27, se observa que la aceleración fue tendiendo al valor de $0 \frac{cm}{s^2}$. Los picos que se observaron en la gráfica se deben a las características propias de la simulación, donde, por efecto del fenómeno, existe la condición de deformación de malla. En consecuencia, numéricamente, luego de ciertos pasos

de tiempo, la malla resultó inservible debido a su deformación y fue necesario, en cada caso, detener la simulación, remallar y continuar donde había quedado la anterior; los picos son producto de la interpolación entre mallas que realiza la herramienta computacional al partir de los resultados anteriores.

De la Gráfica 4.28 se puede observar como al inicio del movimiento de la esfera, la curva de desplazamiento se aproxima a una parábola, sin embargo al transcurrir los Pasos de Tiempo, empezó a presentar un comportamiento rectilíneo, siendo indicativo de que el cuerpo empezó a desplazarse a velocidad constante. Esto ocurre, numéricamente, luego de que la esfera se haya desplazado alrededor de 30 cm.

En la Figura 4.5 se muestra el perfil de velocidades obtenido numéricamente, comparándolo con el perfil de velocidades teórico.

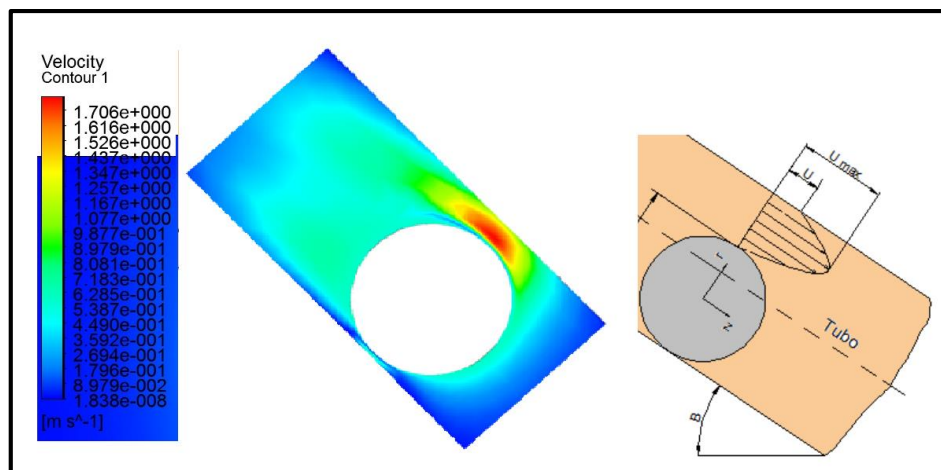


Figura 4.5. Comparación del Perfil de Velocidad obtenido numéricamente y el perfil de Velocidad teórico

El perfil de velocidad obtenido numéricamente se asemeja en gran medida al perfil teórico. Se puede notar que sobre la esfera el valor de la velocidad es prácticamente nulo. También se observa que dicho perfil tiene forma parabólica, ubicándose la mayor velocidad en el medio del espacio existente entre la esfera y el tubo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La utilización del reómetro de bola rodante en el estudio de flujos hiperconcentrados proporciona resultados que se aproximan a las curvas reológicas obtenidas por el investigador Phillippe Coussot, lo cual certifica la validez de uso del instrumento en el análisis experimental de este tipo de flujos.
- La evaluación de los resultados obtenidos con las diferentes relaciones entre el diámetro de la bola y el diámetro del tubo permitió deducir que la relación $d/D=0,83$ fue la que proporcionó mejores resultados en el rango de concentraciones entre 15% y 20%, tomando las curvas reológicas de Phillippe Coussot como referencia. La relación $d/D=0,67$ proporcionó resultados aceptables para la concentración de 25%, presentando, sin embargo, un error considerable.
- El rango de ángulos de inclinación definido proporcionó un amplio rango de tasas de deformación, pudiendo deducir que los valores que se aproximaron en mayor medida a las curvas de referencia fueron los obtenidos a bajas tasas de deformación.
- Se pudo comprobar que el factor concentración tiene considerable incidencia en la viscosidad del fluido. De esta manera, a mayor concentración el fluido se hace más viscoso.

- Las experiencias demostraron que el fluido ensayado es altamente viscoso, fundamentalmente a bajas tasas de deformación. A medida que aumenta la tasa de deformación la viscosidad disminuye.
- Las repeticiones efectuadas para cada prueba permitieron comprobar que el instrumento construido proporciona resultados precisos. De esta manera, la incertidumbre por repetibilidad es baja.
- En la simulación numérica del reómetro de bola rodante, el mallado no estructurado utilizado proporcionó resultados satisfactorios.
- Las simplificaciones realizadas en la simulación numérica afectaron los resultados obtenidos. De esta manera, el ángulo correspondiente al esfuerzo de cedencia varió levemente con respecto al encontrado de forma experimental.
- El perfil de velocidades presente en el fenómeno es complejo. Se pudo obtener una representación del mismo que cumple con las condiciones del movimiento de la esfera.

5.2 RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, se realizan las siguientes recomendaciones para investigaciones futuras relacionadas al tema:

- Construir un sistema de posicionamiento angular más preciso que permita un mejor manejo del instrumento y un cambio de ángulos mucho más gradual y preciso.
- Incrementar el número de repeticiones de las pruebas efectuadas a bajas tasas de deformación.
- Instrumentar el reómetro con un sistema que permita detectar el paso de la esfera de acero cuando se encuentre en un punto determinado.
- Grabar el proceso de toma de datos con una cámara de alta velocidad que proporcione una apreciación adicional de la velocidad de la bola en el tubo.
- Utilizar el mayor número de concentraciones posible para la calibración del instrumento
- Desarrollar un método de calibración en base a un análisis teórico para fluidos de Herschell-Bulkley que permita aumentar la precisión de los resultados.
- Utilizar malla deformable mediante la programación de un script que permita realizar un remallado a medida que la esfera avanza.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alves, S., Barbato C., Pinto, J., Nele, M. (2008). *Studies of Kaolin Rheology*. Trabajo presentado en la IX Jornada Argentina de Tratamiento de Minerales. San Juan, Argentina.
2. Ancey, C. (2001). Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions. *Journal of Rheology*, 45: 1421-1439.
3. Arvelo, R. y Díaz, R. (2009). 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 Universidad Central de Venezuela para optar al Título de Ingeniero Mecánico, Caracas, Venezuela.
4. Bagchi, A. y Chhabra, R. P. (1991). Rolling Ball for Newtonian Power Law. *Chem. Eng. Process*, 30: 11-13.
5. Bingham, E.C. (1916). An investigation of the laws of the plastic flow. *U.S. Bureau of Standards Bulletin*, 13: 309-353
6. Bird, B. y Turian, R. (1964). Non-newtonian flow in a rolling-ball viscometer. *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 13: 87.
7. Blanco, A. (2013). *Flujo viscoso laminar*. Ponencia presentada en el Curso de Mecánica del Medio Continuo en la Fundación Instituto de Ingeniería, Caracas, Venezuela.
8. Blanco, A., García R., Berríos R., Méndez, D. *Una metodología experimental para la preparación de muestras de barros para estudios de aludes torrenciales*. II Simposio Internacional Gestión del Agua y Medio Ambiente. Instituto de Mecánica de Fluidos, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela 2003.
9. Block, R.B. (1942). Resistance to the uniform motion of a solid through a viscous liquid-II. *J. Appl.Phys.* 13: 56-65

10. Briscoe, B.J., Luckham, P.F. y Ren, S.R. (1992). An assessment of a rolling-ball viscometer for studying non-Newtonian fluids. *Colloids and Surfaces*, 62: 153-162.
11. Carrasco, X. (2011). Análisis del comportamiento de un flujo hiperconcentrado mediante un modelo físico reducido. Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de Ingeniera Mecánico. Caracas, Venezuela.
12. Castillo Navarro 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.
13. Chhabra, R. y Richardson, J. (1999). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*. Butterworth-Heinemann: Elsevier
14. Corominas, J. (1998). *Tipos de rotura en laderas y taludes*. Apuntes para la carrera de Ingeniería Geológica en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
15. Costa, J.E. (1984) Physical geomorphology of debris flow. En: Costa, J.E. y Fleisher, P.J. (Eds.), *Developments and Applications of Geomorphology*, (268-317) Springer, Berlin y New York.
16. Costa, J.E. (1988) Floods from dam failures. En Baker, V.R., Kochel, R.C. y Patton P.C., (Eds.), *Flood Geomorphology*, (439-463). John Wiley & Sons, New York.
17. Coussot, P. (1992). *Rheology of debris flows*. Study of concentrated dispersions and suspensions. Tesis de Ph.D. INPG, Grenoble Francia
18. Coussot P. (1997). *Mudflow rheology and dynamics*. Balkema A.A. (Ed.), Rotterdam, Netherlands
19. Coussot, P. y Boyer. (1995). Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test. *Rheological Acta*, 34: 534-543.
20. Coussot, P., y Meunier, M. (1996) Recognition, classification, and mechanical description of debris flow. *Earth-Science Reviews*, 40: 209-227.

21. Coussot, P., y Piau, J.M. (1995) A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *Journal of Rheology*, 39: 105-124.
22. Coussot, P., Ancey, C. (1999). Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes *Physical Reviews*. 59: 4445-4457.
23. Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A. y Marchi, L. (1998). Direct determination of rheological characteristics of debris flow *Journal of Hydraulic Engineering*. 124: 865-868.
24. Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996). Landslides types and processes. En Turner, A.K. y Shuster, R.L. (Eds.) *Landslides investigation and mitigation* (36-75). Special Report 247. Transportation Research Board, U.S. National Research Council. Washington, D.C.
25. Daily, J. y Harleman, DRF. (1975). *Dinámica de los fluidos: con aplicaciones en la ingeniería*. México: Editorial Trillas.
26. Denlinger, R.P. e Iverson, R.M. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 2. Numerical predictions and experimental tests. *Journal of Geophysical Research*, 106: 553-566.
27. Flowers, A. E. (1914). Viscosity Measurement and a New Viscometer, *Am. Soc. Test. Mater. Proc.* 14: 565-616.
28. García, S. (2008). *Caracterización Geotécnica de la Matriz del Flujo de Detritos de 1959 en el Poblado de Minatitlán*. Tesis presentada ante la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo para optar al Título de Maestro en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Morelia, México.
29. Hasan, M. (1986). Wall effects on the motion of a rolling sphere in a closely fitting tube. *The Chemical Engineering Journal*, 33: 97-101
30. Herschel, W. y Bulkley, R (1926). *Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions. Proceedings of the American Society for Testing and Materials. Pt. II.* 26: 621-633.

31. Hersey. M. D. (1916). The Theory of Torsion and the Rolling Ball Viscometers, and their Use in Measuring the Effect of Pressure on Viscosity. *J. Wash. Acad. Sci.* 6: 525-530.
32. Hoeppler, F. (1933). The eccentric fall of spheres through liquids or gases in cylinders, *Z. Tech. Physik*, 14:165
33. Hubbard, R. M. y Brown, G. (1943). The Rolling Ball Viscometer, *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 15: 212- 218.
34. Hungr, O., Evans, S. G. Boris, M. y Hutchinson, J.N. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII: 221-238.
35. Iverson, R.M. (1997). The physics of debris flow. *Reviews of Geophysics* 35: 245-296.
36. Johnson, A.M. y Martosudarmo, S.Y. (1997). Discrimination between inertial and macro-viscous flows of fine-grained debris with a rolling-sleeve viscometer” En: Chen, C.L. (Ed.) Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction and assessment proceedings of the first international conference (229.-238). San Francisco, California, 7-9 agosto. American Society of Civil Engineers.
37. Martínez A., Sánchez I., Osorio-Mirón A., López L., Sánchez L.A. y Hernández E., (2011). Caracterización reológica de soluciones azucaradas para el proceso de evaporación-cristalización. *Nexo*, 24: 61-71.
38. Lawson, D. E. (1982). Mobilization, movement and deposition of active subaerial sediment flow, Matanuska Glacier, Alaska. *Journal of Geology*, 90: 279 -300.
39. Lewis, H. W. (1953) Calibration of the Rolling Ball Viscometer. *Anal. Chem.* 25: 507-508.
40. López, L., Miranda, I. (2009) Efecto de la viscosidad de una suspensión en la clasificación de hidrociclones. Trabajo de Grado de Pregrado. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia.

41. López J. (2006). Los deslaves de Vargas de 1999 y sus medidas de prevención”. En: Grases J. (Ed.), *Ingeniería Forense y estudios de Sitios: Guía para la Prevención y gestión de Riesgos*, (31-56) Impresos Minipres C.A., Caracas, Venezuela.
42. Nuntiya, A., Prasanphan, S. The rheological behavior of kaolin suspensions. *Chiang Mai Journal of Science*, 2006, 33: 271-281
43. O’Brien, J.S. (1986) *Physical processes, rheology and modeling of mudflow*. Tesis para optar al grado de Doctor of Philosophy (PhD), presentada al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Colorado, USA.
44. O’Brien, J.S. y Julien, P.Y. (1988) Laboratory analysis of mudflow propertie. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114: 877-887.
45. Parson, J.D. Kelin, X.W. y Simoni, A. (2001) Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows. *The Journal of Geology*, 109: 427-447.
46. Pierson, C.T. (1980). Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand. *Earth Surface Processes*, 5: 227-247.
47. Pierson, T.C., (1981). *Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mount Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility: Sedimentology*, 28: 49-60
48. Pierson, T.C. y Costa, J.E. (1987) A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. En: Costa, J.E. y Wieczoreck, G.F. (Eds.): *Debris flows/avalanches: process, recognition and mitigation. Reviews in Engineering Geology*, 7: 1-12. Geological Society of America
49. Rodine, J. D. y Johnson, A. (1976). The ability of debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes, 23: 213-234
50. Rojas, N. (2013). *Modelación de la Ecuación Constitutiva de Suspensiones de Caolín en Función de la Energía Libre Superficial del*

Mineral. Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctor en Ingeniería – Ciencia y Tecnología de los Materiales, presentada a la Escuela de Ingeniería de Materiales y Minerales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

51. Sánchez, M. (2009). Modelación de flujos de derrubios empleando el método sph. Aplicación a casos reales. Tesis para optar al grado de Doctor of Philosophy (PhD), presentada al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Colorado, USA.
52. Savage, S.B. y McKeown, S. (1983). Shear stresses developed during rapid shear of concentrated suspensions of large spherical particles between concentric cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 127: 453-472.
53. Savage, S. B. y Sayed, M. (1984) Stressed developed by dry cohesionless granular material down a rough incline” *Journal of Fluid Mechanics*, 199: 177-215.
54. Schäfer, M. (2006). *Computational Engineering - Introduction to Numerical Methods*. Berlín: Springer.
55. Sesták, J. y Ambros, F. (1973) On the use of the rolling-ball viscometer for the measurement of rheological parameters of power law fluid. *Rheol. Acta*, 12: 70-76.
56. Takahashi, T. (1991) *Debris Flow*. Rotterdam, Netherlands: Balkema Publishers.
57. 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
58. Varnes H., Hutton J. y Walters K. (1989). *An introduction to Rheology*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Publishers.
59. Vanoni, V. A. (2006). *Sedimentation engineering* (No. 54). ASCE Publications.

60. Versteeg, H.K. y Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volumen method*. 2da Ed. Edimburg: Pearson
61. Zamora, J.M., Espina S., Rodríguez M., Vargas G., Moreno P., Vejar F., Ridelis H., Mira I., Tirode E., Pizzino A., Alvarez G., Marfisi F., Rojas O., Briceño M.I., Bracho C., Bullon J., Salager J.L. (2007). Desarrollo de equipos de laboratorio comerciales en la Universidad de los Andes: sinergia FIRP-CITEC. *VI Jornadas científico-técnicas de Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes*. Mérida 08-11 de octubre

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Blanco, A., Rodríguez, C., García, R. ¿Es válido utilizar con precisión parámetros reológicos obtenidos en laboratorio para modelar aludes torrenciales a escala real?. Rev. Fac. Ing. UCV, Caracas, 24 n.1, marzo 2009. Recuperado el 10 de febrero de 2014 del sitio Web: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S0798-40652009000100004&lng=
2. Fuentes R. (2008). *Reología de suspensiones sólido-liquido (barros) algunos aspectos teóricos y experimentales antiguos y recientes*. Ponencia recuperada el 20 de mayo de 2014 del sitio Web: http://www.imta.gob.mx/historico/eventos/seminario-potamologia/ponencias/Dr_Fuentes, 18 de junio de 2014.
3. Maskrey, A. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*. [En línea]. Editorial: La Red. Recuperado el 21 noviembre de 2013 en: <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/>
4. U.S.G.S. Servicio geológico de los Estados Unidos. (1999). *Real-time monitoring of actives landslides. Reducing landslides hazards in the Unites States. USGS Fact Sheet 091-99*. Recuperado el 02 de diciembre de 2013 en: <http://landslides.usgs.gov/>
5. Wang, J.S. y Jan, C.D. (2002) Rheological behavior of gravel-mud mixtures *International Conference on Hydro-Science and Engineering*. Varsovia-Polonia. 18-21 de septiembre. En: [http://www.kfki.baw.de/fileadmin/conferences/ICHE/2002-Warsaw/ARTICLES /PDF/167C4.pdf](http://www.kfki.baw.de/fileadmin/conferences/ICHE/2002-Warsaw/ARTICLES/PDF/167C4.pdf). Consultado el 16 de junio de 2014.

APÉNDICE

APÉNDICE A

MODELOS REOLÓGICOS

Existen varios modelos que tratan de describir el comportamiento reológico de los fluidos no newtonianos (véase *Figura A.1.1*). Los mismos son representados a continuación:

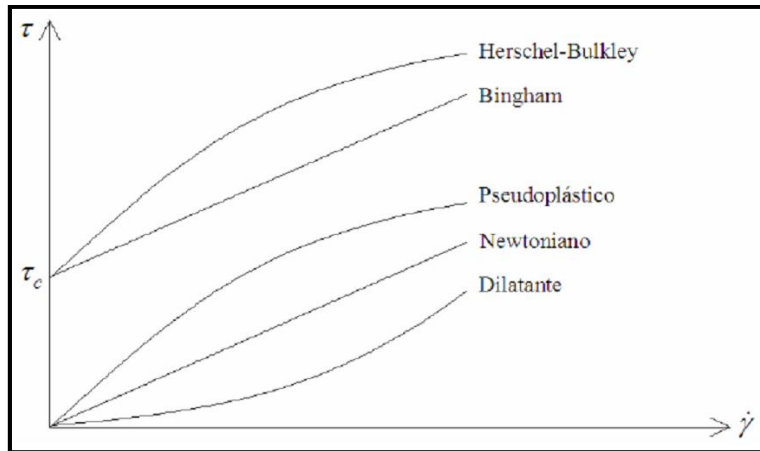


Figura A.1. 1. Modelos reológicos

Fuente: Sánchez (2009).

A.1.1 MODELO DE BINGHAM

Este modelo fue propuesto por Bingham (1916). Los fluidos de Bingham o plástico ideal son aquellos que para esfuerzos cortantes menores al esfuerzo de cedencia se comportan elásticamente, mientras que para valores mayores se comporta como un fluido newtoniano. Su comportamiento está representado por Ecuación (A.1.1):

$$\tau = \tau_c + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{A.1.1})$$

Donde:

τ = Esfuerzo de corte

τ_c = Esfuerzo de cedencia

η_{pl} = Pendiente de la curva de esfuerzo cortante vs tasa de deformación

$\dot{\gamma}$ = Tasa de deformación

A.1.2 MODELO PSEUDOPLÁSTICO

Este tipo de fluidos no tiene esfuerzo de cedencia para empezar a deformarse, pero su viscosidad es alta para bajas tasas de deformación y decrece a medida que $\dot{\gamma}$ aumenta hasta alcanzar un valor asintótico constante.

Está dado por la Relación (A.1.2):

$$\begin{aligned}\tau &= m\dot{\gamma}^n & (A.1.2) \\ n &< 1\end{aligned}$$

A.1.3 MODELO DILATANTE

Son mucho menos comunes que los fluidos pseudoplásticos. En ellos la viscosidad aumenta a medida que se incrementa la tasa de deformación hasta alcanzar un valor asintótico constante.

Está representado por la Ecuación (A.1.3):

$$\begin{aligned}\tau &= m\dot{\gamma}^n & (A.1.3) \\ n &> 1\end{aligned}$$

Los fluidos que se aproximan al Modelo Pseudoplástico y Dilante son también denominados Fluidos de Ley de Potencia.

A.1.4 MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY

Este modelo fue propuesto por Herschel-Bulkley (1926). Representa el modelo más general para la describir el comportamiento reológico de un fluido.

Se expresa por la Ecuación (A.1.4):

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{A.1.4})$$

Donde:

τ = Esfuerzo de corte

τ_c = Esfuerzo de cedencia

K = Coeficiente de consistencia

$\dot{\gamma}$ = Tasa de deformación

n = Índice de Herschel-Bulkley (Desviación frente a un fluido newtoniano)

De esta manera, presenta los siguientes casos particulares:

Si $n=1$ y $\tau_c=0$ se trata de un fluido newtoniano

Si $n=1$ y $\tau_c >0$ se trata de un fluido tipo Bingham

Si $n >1$ y $\tau_c=0$ se trata de un fluido tipo pseudoplástico

Si $n <1$ y $\tau_c=0$ se trata de un fluido tipo dilatante

ANEXOS

Anexo 1. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 15%

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m³)	Densidad de la esfera (Kg/m³)	Densidad de la mezcla (Kg/m³)
0,038	0,0569	0,226	2,87309E-05	7866,092	1245
Concentración: 15 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	1	0,1	10000	0,000	0,000
2	2,5	0,75	34,87	0,022	0,024
3		0,75	28,23	0,027	
4	3	0,75	17,96	0,042	0,047
5		0,75	14,31	0,052	
6	4	0,75	9,65	0,078	0,087
7		0,75	7,74	0,097	
8	5	0,75	5,71	0,131	0,144
9		0,75	4,79	0,157	
10	7,5	0,75	3,31	0,227	0,228
11		0,75	3,26	0,230	
12	10	0,75	2,92	0,257	0,262
13		0,75	2,81	0,267	
14	12,5	0,75	2,35	0,319	0,323
15		0,75	2,29	0,328	
16	15	0,75	2,05	0,366	0,371
17		0,75	1,99	0,377	
18	17,5	0,75	1,45	0,517	0,523
19		0,75	1,42	0,528	
20	20	0,75	1,32	0,568	0,575
21		0,75	1,29	0,581	
22	25	0,75	1,28	0,586	0,603
23		0,75	1,21	0,620	
24	30	0,75	1,16	0,647	0,655
25		0,75	1,13	0,664	
26	35	0,75	1,1	0,682	0,691
27		0,75	1,07	0,701	
28	40	0,75	0,92	0,815	0,839
29		0,75	0,87	0,862	
30	45	0,75	0,85	0,882	0,893
31		0,75	0,83	0,904	
32	50	0,75	0,81	0,926	0,950
33		0,75	0,77	0,974	
34	60	0,75	0,73	1,027	1,057
35		0,75	0,69	1,087	

Anexo 2. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 15%

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
1	0,000	43,076	0,001
2,5	0,024	107,662	2,037
3	0,047	129,176	3,990
4	0,087	172,174	7,399
5	0,144	215,119	12,200
7,5	0,228	322,166	19,349
10	0,262	428,600	22,193
12,5	0,323	534,219	27,401
15	0,371	638,820	31,472
17,5	0,523	742,205	44,297
20	0,575	844,178	48,711
25	0,603	1043,111	51,092
30	0,655	1234,105	55,520
35	0,691	1415,708	58,591
40	0,839	1586,535	71,071
45	0,893	1745,289	75,676
50	0,950	1890,759	80,506
60	1,057	2137,533	89,591

Anexo 3. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 15%

τ [Pa]	γ [1/s]	τ_{HB}	$\tau_{HB}-\tau$	$(\tau_{HB}-\tau)^2$
43,076	0,000	83,439	40,363	1629,141
107,662	2,037	95,647	-12,015	144,352
129,176	3,990	113,859	-15,317	234,626
172,174	7,399	153,799	-18,375	337,627
215,119	12,200	222,195	7,077	50,078
322,166	19,349	343,007	20,841	434,351
428,600	22,193	396,127	-32,473	1054,521
534,219	27,401	499,761	-34,457	1187,314
638,820	31,472	585,924	-52,896	2797,994
742,205	44,297	882,741	140,536	19750,284
844,178	48,711	992,782	148,604	22083,226
1043,111	51,092	1053,667	10,556	111,439
1234,105	55,520	1169,587	-64,519	4162,644
1415,708	58,591	1251,978	-163,729	26807,253
1586,535	71,071	1602,321	15,785	249,174
1745,289	75,676	1737,494	-7,795	60,755
1890,759	80,506	1882,461	-8,298	68,852
2137,533	89,591	2163,579	26,046	678,400
				81842,033

Anexo 4. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 15%

τ (Pa)	γ (1/s)	η aparente (Pa.s)
4,772	0,000	-
12,497	2,037	6,135
14,032	3,990	3,517
15,710	7,399	2,123
17,289	12,200	1,417
18,947	19,349	0,979
19,481	22,193	0,878
20,341	27,401	0,742
20,934	31,472	0,665
22,494	44,297	0,508
22,954	48,711	0,471
23,189	51,092	0,454
23,607	55,520	0,425
23,882	58,591	0,408
24,904	71,071	0,350
25,247	75,676	0,334
25,592	80,506	0,318
26,201	89,591	0,292

Anexo 5. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 20

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m ³)	Densidad de la esfera (Kg/m ³)	Densidad de la mezcla (Kg/m ³)
0,038	0,0569	0,226	2,87309E-05	7866,092	1300
Concentración: 20 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	4,5	0,1	10000	0,000	0,000
2	5	0,815	22,95	0,036	0,039
3		0,815	18,98	0,043	
4	6	0,815	12,45	0,065	0,073
5		0,815	10,05	0,081	
6	7,5	0,815	9,19	0,089	0,097
7		0,815	7,67	0,106	
8	9	0,815	5,94	0,137	0,159
9		0,815	4,52	0,180	
10	10	0,815	3,31	0,246	0,260
11		0,815	2,98	0,273	
12	15	0,815	2,16	0,377	0,387
13		0,815	2,05	0,398	
14	20	0,815	1,76	0,463	0,479
15		0,815	1,65	0,494	
16	25	0,815	1,42	0,574	0,578
17		0,815	1,4	0,582	
18	30	0,815	1,39	0,586	0,619
19		0,815	1,25	0,652	
20	35	0,815	1,22	0,668	0,676
21		0,815	1,19	0,685	
22	40	0,815	1,18	0,691	0,694
23		0,815	1,17	0,697	
24	45	0,815	1,1	0,741	0,748
25		0,815	1,08	0,755	
26	50	0,815	0,92	0,886	0,911
27		0,815	0,87	0,937	
28	60	0,815	0,81	1,006	1,026
29		0,815	0,78	1,045	

Anexo 6. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Mediana-Tubo Mediano $C_v= 20\%$

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
4,5	0,000	192,045	0,001
5	0,039	213,332	3,324
6	0,073	255,855	6,210
7,5	0,097	319,490	8,260
9	0,159	382,906	13,454
10	0,260	425,040	22,022
15	0,387	633,513	32,834
20	0,479	837,165	40,551
25	0,578	1034,446	48,986
30	0,619	1223,854	52,471
35	0,676	1403,948	57,326
40	0,694	1573,356	58,782
45	0,748	1730,791	63,370
50	0,911	1875,053	77,231
60	1,026	2119,777	86,908

Anexo 7. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 20%

τ [Pa]	γ [1/s]	τ_{HB}	$\tau_{HB}-\tau$	$(\tau_{HB}-\tau)^2$
192,045	0,000	118,093	-73,952	5468,942
213,332	3,324	150,132	-63,200	3994,239
255,855	6,210	189,538	-66,317	4397,975
319,490	8,260	221,125	-98,365	9675,594
382,906	13,454	310,782	-72,124	5201,842
425,040	22,022	480,741	55,701	3102,638
633,513	32,834	723,573	90,059	8110,669
837,165	40,551	911,979	74,813	5597,004
1034,446	48,986	1129,872	95,426	9106,135
1223,854	52,471	1223,158	-0,696	0,484
1403,948	57,326	1356,054	-47,893	2293,753
1573,356	58,782	1396,538	-176,818	31264,707
1730,791	63,370	1525,985	-204,806	41945,294
1875,053	77,231	1932,829	57,776	3338,106
2119,777	86,908	2229,690	109,912	12080,734
				145578,115

Anexo 8. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 20%

τ (Pa)	γ (1/s)	η aparente (Pa.s)
21,273	0,000	-
34,057	3,324	10,245
36,264	6,210	5,840
37,395	8,260	4,527
39,529	13,454	2,938
41,971	22,022	1,906
44,189	32,834	1,346
45,456	40,551	1,121
46,649	48,986	0,952
47,097	52,471	0,898
47,686	57,326	0,832
47,855	58,782	0,814
48,369	63,370	0,763
49,770	77,231	0,644
50,641	86,908	0,583

Anexo 9. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 25%

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m³)	Densidad de la esfera (Kg/m³)	Densidad de la mezcla (Kg/m³)
0,038	0,0569	0,226	2,87309E-05	7866,092	1375
Concentración: 25 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	11,5	0,1	10000	0,000	
2	15	0,815	240,01	0,003	0,004
3		0,815	204,2	0,004	
4	17,5	0,815	63,52	0,013	0,013
5		0,815	58,9	0,014	
6	20	0,815	26,98	0,030	0,032
7		0,815	23,73	0,034	
8	25	0,815	5,73	0,142	0,146
9		0,815	5,47	0,149	
10	30	0,815	3,89	0,210	0,223
11		0,815	3,44	0,237	
12	35	0,815	2,39	0,341	0,359
13		0,815	2,16	0,377	
14	40	0,815	1,94	0,420	0,425
15		0,815	1,9	0,429	
16	45	0,815	1,82	0,448	0,452
17		0,815	1,79	0,455	
18	50	0,815	1,76	0,463	0,480
19		0,815	1,64	0,497	
20	55	0,815	1,6	0,509	0,519
21		0,815	1,54	0,529	
22	60	0,815	1,51	0,540	0,547
23		0,815	1,47	0,554	

Anexo 10. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 25%

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
11,5	0,000	482,420	0,000
15	0,004	626,277	0,313
17,5	0,013	727,633	1,130
20	0,032	827,603	2,735
25	0,146	1022,630	12,340
30	0,223	1209,875	18,916
35	0,359	1387,911	30,437
40	0,425	1555,385	35,977
45	0,452	1711,021	38,267
50	0,480	1853,636	40,679
55	0,519	1982,143	44,008
60	0,547	2095,564	46,362

Anexo 11. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 25%

τ (Pa)	γ (1/s)	τ_{HB}	$\tau_{HB}-\tau$	$(\tau_{HB}-\tau)^2$
482,420	0,000	641,938	159,518	25.445,880
626,277	0,313	647,871	21,594	466,304
727,633	1,130	665,925	-61,708	3.807,892
827,603	2,735	704,707	-122,896	15.103,507
1.022,630	12,340	965,348	-57,283	3.281,295
1.209,875	18,916	1.156,727	-53,148	2.824,687
1.387,911	30,437	1.505,721	117,810	13.879,133
1.555,385	35,977	1.678,089	122,704	15.056,242
1.711,021	38,267	1.750,075	39,053	1.525,165
1.853,636	40,679	1.826,268	-27,367	748,979
1.982,143	44,008	1.932,122	-50,021	2.502,084
2.095,564	46,362	2.007,401	-88,163	7.772,720
				92.413,887

Anexo 12. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Mediana-Tubo Mediano Cv= 25%

τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	η aparente (Pa.s)
53,439	0,000	
75,865	0,313	242,378
83,034	1,130	73,483
89,263	2,735	32,634
103,049	12,340	8,351
107,846	18,916	5,701
113,735	30,437	3,737
115,954	35,977	3,223
116,793	38,267	3,052
117,635	40,679	2,892
118,736	44,008	2,698
119,475	46,362	2,577

Anexo 13. Bola Pequeña-Tubo Pequeña Cv= 15%

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m ³)	Densidad de la esfera (Kg/m ³)	Densidad de la mezcla (Kg/m ³)
0,026	0,0312	0,076	9,20277E-06	8258,381	1245
Concentración: 15 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	2	0,1	10000	0,000	0,0000
2	2,5	0,94	58,37	0,0161	0,0168
3		0,94	53,64	0,0175	
4	3	0,94	46,82	0,0201	0,0215
5		0,94	41,16	0,0228	
6	4	0,94	38,28	0,0246	0,0258
7		0,94	34,74	0,0271	
8	5	0,94	31,6	0,0297	0,0314
9		0,94	28,5	0,0330	
10	10	0,94	8,11	0,1159	0,1169
11		0,94	7,97	0,1179	
12	15	0,94	6,06	0,1551	0,1582
13		0,94	5,83	0,1612	
14	20	0,94	4,7	0,2000	0,2028
15		0,94	4,57	0,2057	
16	25	0,94	4,06	0,2315	0,2391
17		0,94	3,81	0,2467	
18	30	0,94	3,32	0,2831	0,2862
19		0,94	3,25	0,2892	
20	35	0,94	3,18	0,2956	0,2984
21		0,94	3,12	0,3013	
22	40	0,94	3,07	0,3062	0,3087
23		0,94	3,02	0,3113	
24	45	0,94	2,98	0,3154	0,3170
25		0,94	2,95	0,3186	
26	50	0,94	2,84	0,3310	0,3334
27		0,94	2,8	0,3357	
28	55	0,94	2,68	0,3507	0,3583
29		0,94	2,57	0,3658	
30	60	0,94	2,44	0,3852	0,3918
31		0,94	2,36	0,3983	

Anexo 14. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Pequeña-Tubo Pequeño $C_v= 15$

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
2	0,000	62,429	0,003
2,5	0,017	78,028	5,879
3	0,021	93,620	7,503
4	0,026	124,783	9,023
5	0,031	155,907	10,967
10	0,117	310,628	40,883
15	0,158	462,984	55,306
20	0,203	611,817	70,925
25	0,239	755,993	83,609
30	0,286	894,417	100,064
35	0,298	1026,032	104,350
40	0,309	1149,840	107,945
45	0,317	1264,896	110,853
50	0,333	1370,326	116,556
55	0,358	1465,326	125,263
60	0,392	1549,175	136,984

Anexo 15. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Pequeña-Tubo Pequeño Cv= 15%

τ (Pa)	γ (1/s)	τ_{HB}	$\tau_{HB}-\tau$	$(\tau_{HB}-\tau)^2$
62,429	0,000	88,438	26,009	676,467
78,028	5,879	97,842	19,814	392,612
93,620	7,503	102,393	8,773	76,967
124,783	9,023	107,253	-17,530	307,292
155,907	10,967	114,238	-41,670	1736,349
310,628	40,883	305,539	-5,088	25,892
462,984	55,306	442,514	-20,470	419,039
611,817	70,925	618,054	6,237	38,897
755,993	83,609	779,685	23,691	561,280
894,417	100,064	1012,983	118,566	14057,966
1026,032	104,350	1077,932	51,900	2693,583
1149,840	107,945	1133,712	-16,128	260,108
1264,896	110,853	1179,671	-85,225	7263,257
1370,326	116,556	1271,981	-98,345	9671,644
1465,326	125,263	1418,379	-46,947	2204,028
1549,175	136,984	1625,592	76,417	5839,629
				46225,013

Anexo 16. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Pequeña-Tubo Pequeño Cv= 15%

τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	η aparente (Pa.s)
5,444	0,000	-
8,979	5,879	1,527
9,227	7,503	1,230
9,426	9,023	1,045
9,648	10,967	0,880
11,507	40,883	0,281
12,039	55,306	0,218
12,512	70,925	0,176
12,843	83,609	0,154
13,223	100,064	0,132
13,314	104,350	0,128
13,389	107,945	0,124
13,448	110,853	0,121
13,560	116,556	0,116
13,724	125,263	0,110
13,933	136,984	0,102

Anexo 17. Bola Pequeña-Tubo Pequeña Cv= 20%

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m ³)	Densidad de la esfera (Kg/m ³)	Densidad de la mezcla (Kg/m ³)
0,026	0,0312	0,076	9,20277E-06	8258,381	1300
Concentración: 20 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	7,5	0,1	10000	0,000	0,000010
2	8	0,94	520,86	0,001805	0,001928
3		0,94	458,25	0,002051	
4	9	0,94	402,76	0,002334	0,002475
5		0,94	359,2	0,002617	
6	10	0,94	297,74	0,003157	0,003369
7		0,94	262,51	0,003581	
8	12,5	0,94	46,79	0,020090	0,020676
9		0,94	44,21	0,021262	
10	15	0,94	20,46	0,045943	0,047748
11		0,94	18,97	0,049552	
12	20	0,94	9,23	0,101842	0,103376
13		0,94	8,96	0,104911	
14	25	0,94	6,41	0,146646	0,147573
15		0,94	6,33	0,148499	
16	30	0,94	5,49	0,171220	0,175476
17		0,94	5,23	0,179732	
18	35	0,94	4,66	0,201717	0,205303
19		0,94	4,5	0,208889	
20	40	0,94	4,21	0,223278	0,225440
21		0,94	4,13	0,227603	
22	45	0,94	3,75	0,250667	0,256618
23		0,94	3,58	0,262570	
24	50	0,94	3,44	0,273256	0,275271
25		0,94	3,39	0,277286	
26	55	0,94	3,2	0,293750	0,296557
27		0,94	3,14	0,299363	
28	60	0,94	3,03	0,310231	0,311262
29		0,94	3,01	0,312292	

Anexo 18. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Pequeña-Tubo Pequeño
 $C_v = 20\%$

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
7,5	0,000	231,659	0,003
8	0,002	247,005	0,674
9	0,002	277,641	0,866
10	0,003	308,192	1,178
12,5	0,021	384,138	7,229
15	0,048	459,353	16,695
20	0,103	607,019	36,146
25	0,148	750,065	51,599
30	0,175	887,402	61,355
35	0,205	1017,986	71,784
40	0,225	1140,822	78,825
45	0,257	1254,976	89,727
50	0,275	1359,579	96,249
55	0,297	1453,835	103,691
60	0,311	1537,026	108,833

Anexo 19. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Pequeña-Tubo Pequeño Cv= 20%

τ (Pa)	γ (1/s)	τ_{HB}	$\tau_{HB-\tau}$	$(\tau_{HB-\tau})^2$
231,659	0,000	280,745	49,086	2409,440
247,005	0,674	283,384	36,379	1323,459
277,641	0,866	284,317	6,677	44,577
308,192	1,178	285,933	-22,259	495,445
384,138	7,229	327,410	-56,728	3218,081
459,353	16,695	409,288	-50,065	2506,550
607,019	36,146	608,225	1,206	1,454
750,065	51,599	784,632	34,567	1194,876
887,402	61,355	902,172	14,769	218,132
1017,986	71,784	1032,243	14,256	203,247
1140,822	78,825	1122,382	-18,441	340,061
1254,976	89,727	1265,279	10,303	106,147
1359,579	96,249	1352,567	-7,012	49,166
1453,835	103,691	1453,707	-0,128	0,016
1537,026	108,833	1524,485	-12,541	157,278
				12267,929

Anexo 20. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Pequeña-Tubo Pequeño Cv= 20%

τ (Pa)	γ (1/s)	η aparente (Pa.s)
20,202	0,003	-
35,601	0,674	52,811
36,710	0,866	42,413
38,188	1,178	32,419
50,003	7,229	6,917
57,820	16,695	3,463
66,841	36,146	1,849
71,698	51,599	1,390
74,241	61,355	1,210
76,654	71,784	1,068
78,143	78,825	0,991
80,270	89,727	0,895
81,455	96,249	0,846
82,738	103,691	0,798
83,586	108,833	0,768

Anexo 21. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv= 20%

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m ³)	Densidad de la esfera (Kg/m ³)	Densidad de la mezcla (Kg/m ³)
0,026	0,0569	0,076	9,20277E-06	8258,381	1300
Concentración: 20 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	4,5	0,1	10000	0,0000	0,0000
2	5	0,815	128,13	0,0064	0,0066
3		0,815	119,48	0,0068	
4	7,5	0,815	33,31	0,0245	0,0251
5		0,815	31,65	0,0258	
6	10	0,815	6,27	0,1300	0,1323
7		0,815	6,05	0,1347	
8	15	0,815	3,15	0,2587	0,2661
9		0,815	2,98	0,2735	
10	20	0,815	1,93	0,4223	0,4291
11		0,815	1,87	0,4358	
12	25	0,815	1,53	0,5327	0,5474
13		0,815	1,45	0,5621	
14	35	0,815	1,22	0,6680	0,6823
15		0,815	1,17	0,6966	
16	45	0,815	1,13	0,7212	0,7345
17		0,815	1,09	0,7477	
18	60	0,815	0,86	0,9477	1,0245
19		0,815	0,74	1,1014	

Anexo 22. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv= 20%

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
4,5	0,000	139,250	0,000
5	0,007	154,684	0,268
7,5	0,025	231,659	1,019
10	0,132	308,192	5,373
15	0,266	459,353	10,804
20	0,429	607,019	17,419
25	0,547	750,065	22,223
35	0,682	1017,986	27,701
45	0,734	1254,976	29,819
60	1,025	1537,026	41,595

Anexo 23. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv= 20%

τ [Pa]	γ [1/s]	τ_{HB}	$\tau_{HB-\tau}$	$(\tau_{HB-\tau})^2$
139,250	0,000	168,632	29,383	863,353
154,684	0,268	171,758	17,074	291,518
231,659	1,019	184,425	-47,233	2230,991
308,192	5,373	286,822	-21,369	456,653
459,353	10,804	443,983	-15,370	236,240
607,019	17,419	659,628	52,609	2767,703
750,065	22,223	828,036	77,971	6079,463
1017,986	27,701	1029,672	11,686	136,569
1254,976	29,819	1110,013	-144,963	21014,367
1537,026	41,595	1577,216	40,190	1615,272
				35692,130

Anexo 24. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Pequeña-Tubo Mediano Cv= 20%

τ (Pa)	γ (1/s)	η aparente (Pa.s)
22,008	0,000	0,000
28,429	0,268	106,241
31,328	1,019	30,732
36,357	5,373	6,766
39,087	10,804	3,618
41,212	17,419	2,366
42,385	22,223	1,907
43,502	27,701	1,570
43,888	29,819	1,472
45,711	41,595	1,099

Anexo 25. Bola Grande-Tubo Grande Cv= 20%

Diámetro de la esfera (m)	Diámetro de tubo (m)	Masa de la esfera (Kg)	Volumen de la esfera (m³)	Densidad de la esfera (Kg/m³)	Densidad de la mezcla (Kg/m³)
0,07345	0,0825	0,72	0,000207479	3470,232	1300
Concentración: 20 %					
Medición	Ángulo (°)	Longitud (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad media (m/s)
1	12	0,1	10000	0,0000	0,0000
2	15	0,96	215,93	0,0044	0,0046
3		0,96	202,86	0,0047	
4	17,5	0,96	61,98	0,0155	0,0165
5		0,96	54,76	0,0175	
6	19	0,96	37,46	0,0256	0,0267
7		0,96	34,58	0,0278	
8	20	0,96	30,4	0,0316	0,0328
9		0,96	28,19	0,0341	
10	25	0,96	14,2	0,0676	0,0701
11		0,96	13,24	0,0725	
12	30	0,96	9,46	0,1015	0,1036
13		0,96	9,08	0,1057	
14	35	0,96	8,07	0,1190	0,1202
15		0,96	7,91	0,1214	
16	37,5	0,96	7,06	0,1360	0,1367
17		0,96	6,99	0,1373	
18	40	0,96	6,87	0,1397	0,1428
19		0,96	6,58	0,1459	
20	45	0,96	5,11	0,1879	0,1888
21		0,96	5,06	0,1897	
22	50	0,96	5,02	0,1912	0,1926
23		0,96	4,95	0,1939	
24	55	0,96	4,54	0,2115	0,2151
25		0,96	4,39	0,2187	

Anexo 26. Parámetros reológicos equivalentes. Bola Grande-Tubo Grande $C_v= 20\%$

Ángulo (°)	Velocidad Promedio (m/s)	Φ (Pa)	γ (1/s)
12	0,000	325,122	0,002
15	0,005	404,728	0,955
17,5	0,017	470,228	3,437
19	0,027	509,107	5,557
20	0,033	534,833	6,831
25	0,070	660,869	14,584
30	0,104	781,874	21,567
35	0,120	896,929	25,014
37,5	0,137	951,950	28,448
40	0,143	1005,158	29,730
45	0,189	1105,737	39,301
50	0,193	1197,901	40,091
55	0,215	1280,948	44,770

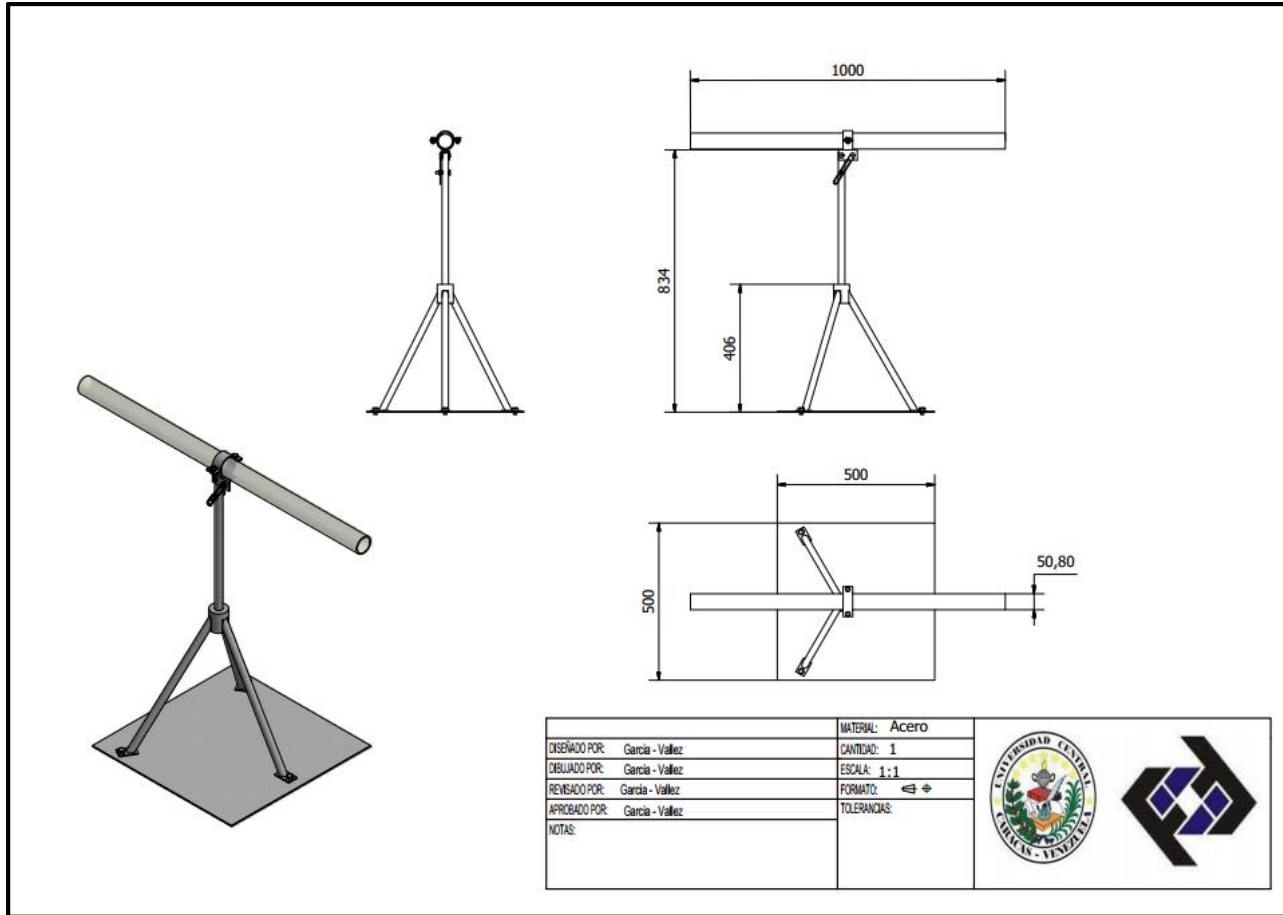
Anexo 27. Ajuste al modelo de Herschell-Bulkley. Bola Grande-Tubo Grande $C_v= 20\%$

τ [Pa]	γ [1/s]	τ_{HB}	$\tau_{HB-\tau}$	$(\tau_{HB-\tau})^2$
325,122	0,002	361,548	36,426	1326,879
404,728	0,955	387,772	-16,955	287,488
470,228	3,437	446,648	-23,580	556,040
509,107	5,557	493,847	-15,259	232,851
534,833	6,831	521,462	-13,372	178,809
660,869	14,584	682,315	21,446	459,925
781,874	21,567	820,884	39,010	1521,758
896,929	25,014	887,834	-9,095	82,720
951,950	28,448	953,775	1,825	3,331
1005,158	29,730	978,223	-26,935	725,509
1105,737	39,301	1158,219	52,482	2754,320
1197,901	40,091	1172,890	-25,011	625,555
1280,948	44,770	1259,384	-21,564	464,989
				9220,173

Anexo 28. Parámetros reológicos obtenidos. Bola Grande-Tubo Grande Cv= 20%

τ (Pa)	γ (1/s)	η aparente (Pa.s)
20	0	-
31,167	0,955	32,624
34,818	3,437	10,131
36,479	5,557	6,564
37,248	6,831	5,452
40,395	14,584	2,770
42,237	21,567	1,958
42,978	25,014	1,718
43,640	28,448	1,534
43,872	29,730	1,476
45,391	39,301	1,155
45,502	40,091	1,135
46,132	44,770	1,030

Anexo 29. Plano del reómetro de bola rodante

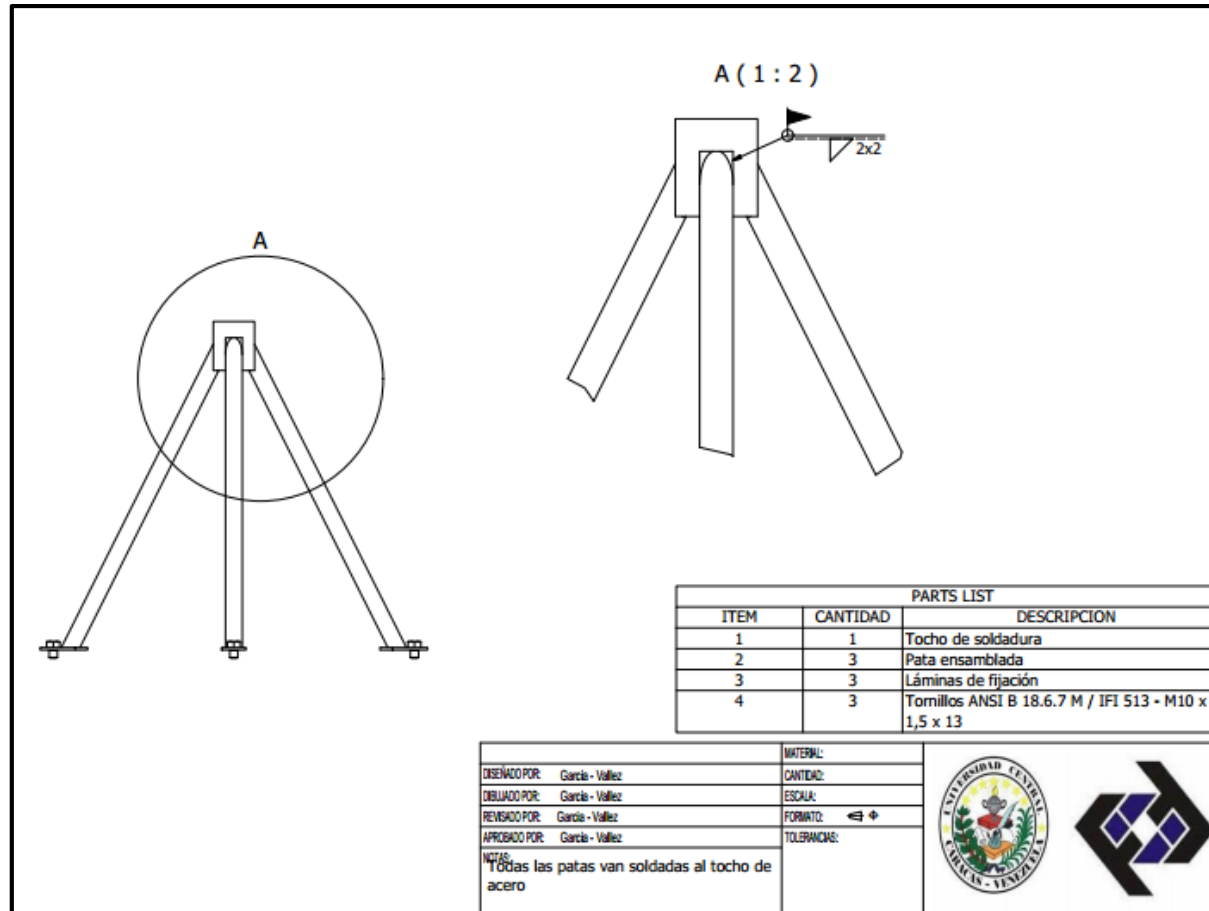


Anexo 30. Ensamblaje de las partes principales del reómetro de bola rodante

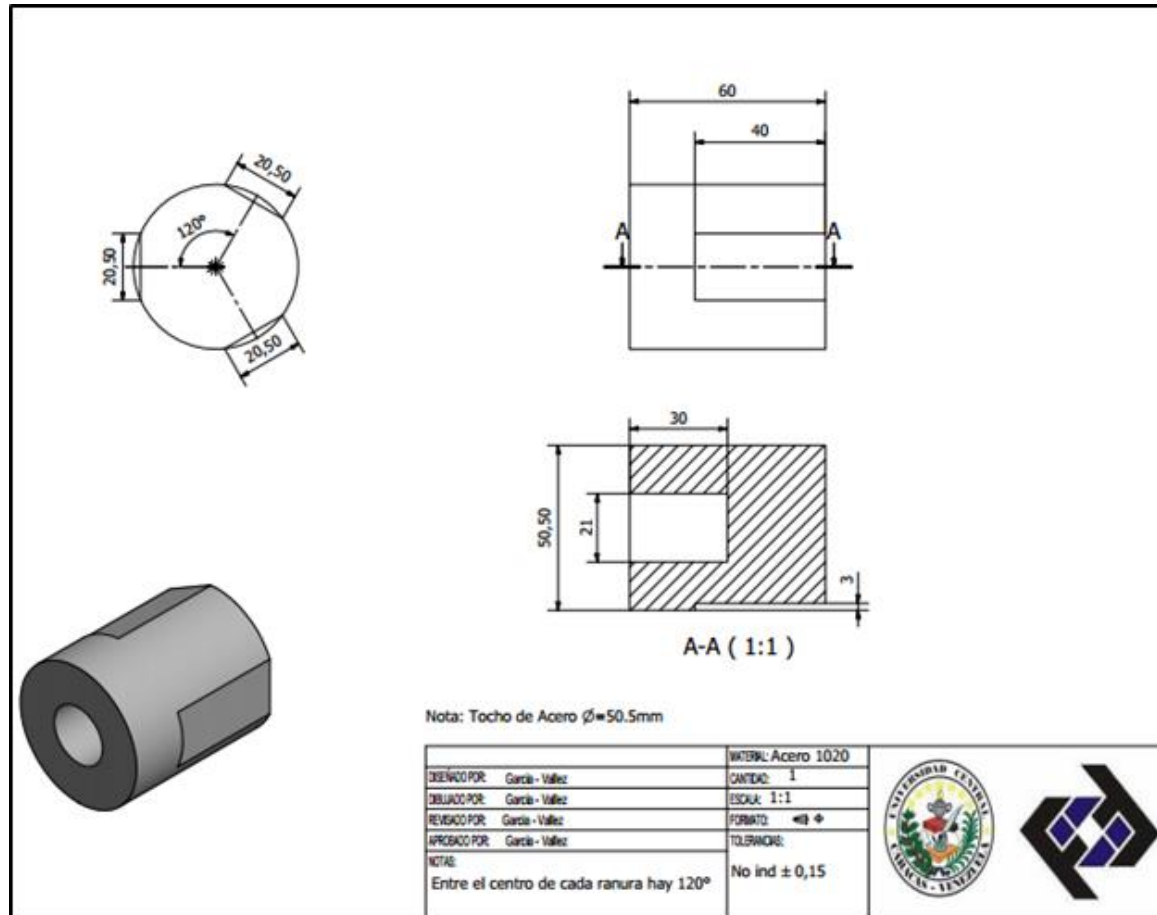
LISTA DE PARTES		
ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCION
11	1	Ensamblaje de pata
12	1	Soporte principal
13	1	Base
3	1	Base de sistema giratorio

DISEÑADO POR: García - Valdez	MATERIAL:
DESEÑADO POR: García - Valdez	CANTIDAD:
REVISADO POR: García - Valdez	ESCALA:
APROBADO POR: García - Valdez	FORMATO: A4
NOTAS:	TOLERANCIAS:

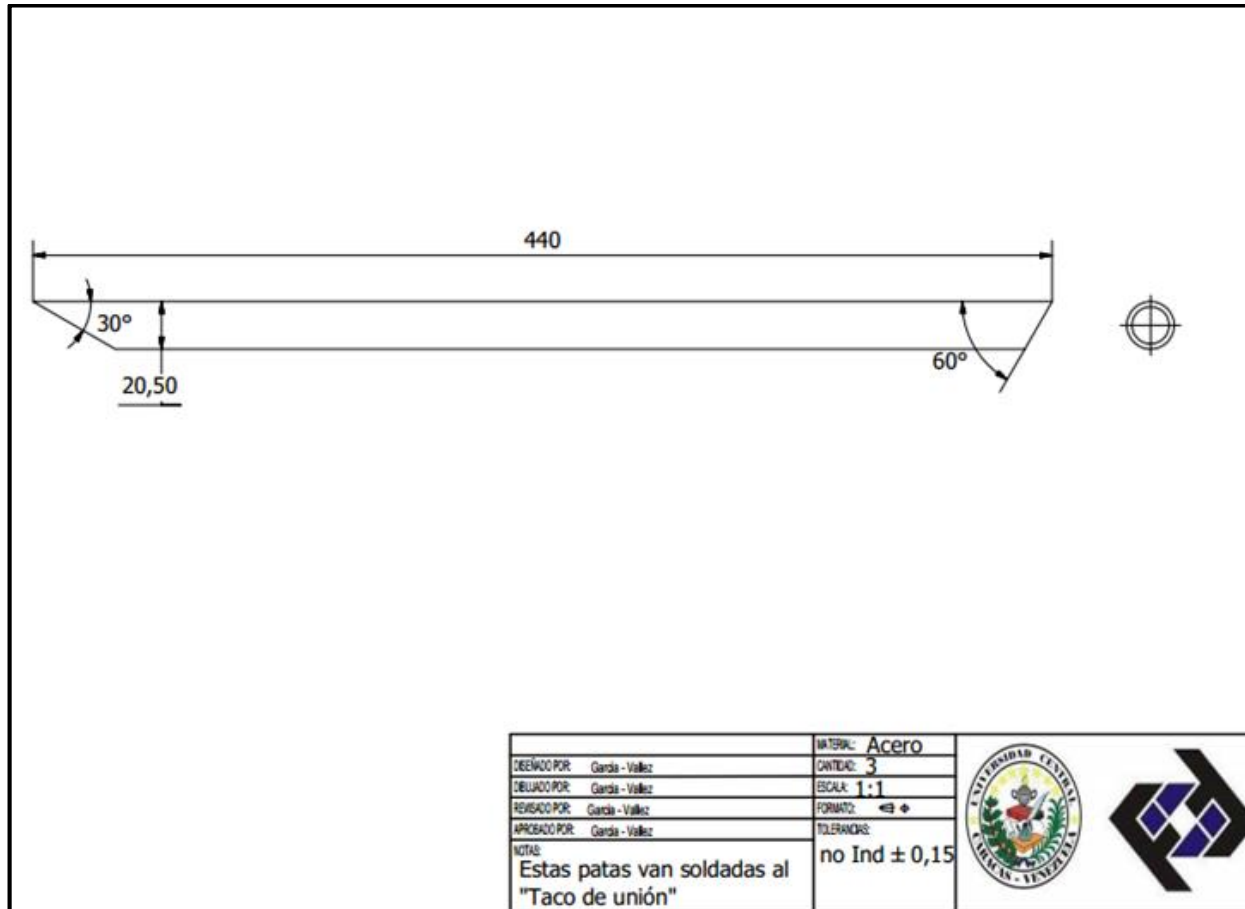
Anexo 31. Detalle de las patas del trípode del reómetro



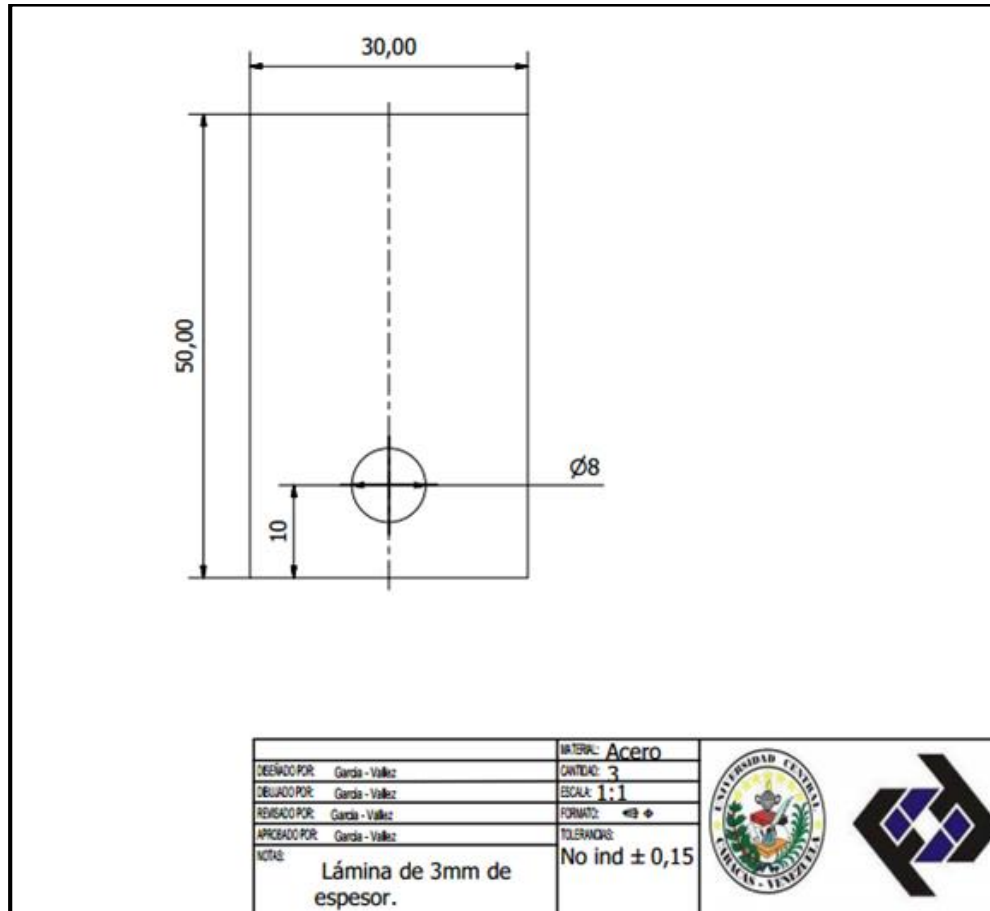
Anexo 32. Pieza de acoplamiento de las patas del tripode



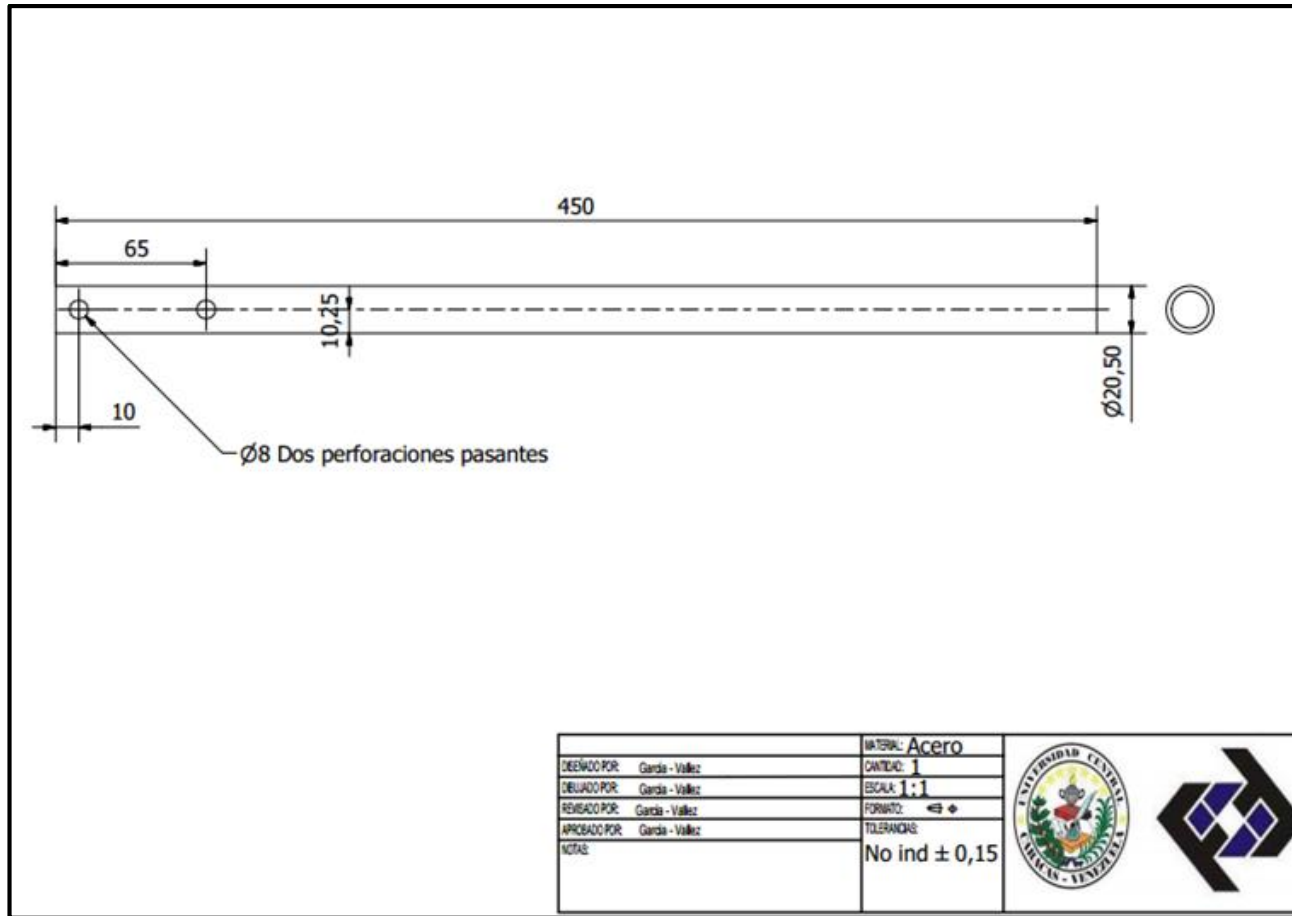
Anexo 33. Patas del trípode



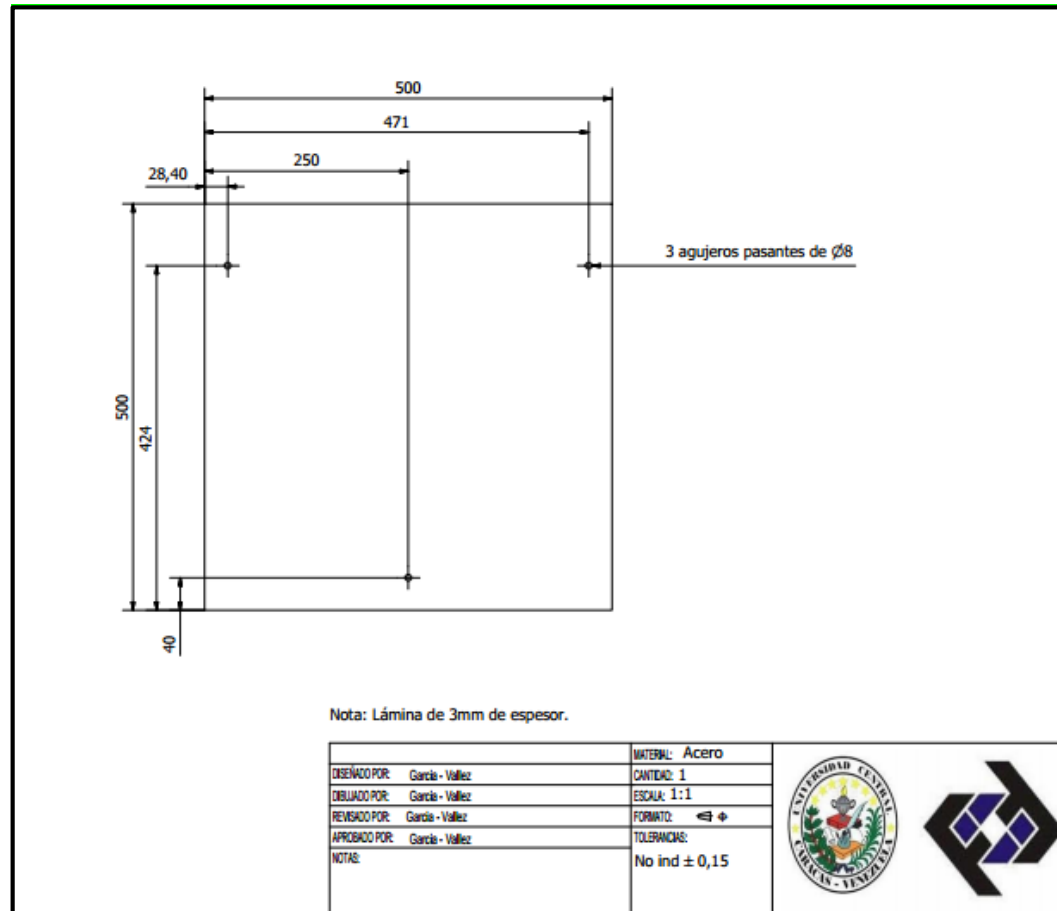
Anexo 34. Lámina de fijación de las patas del trípode



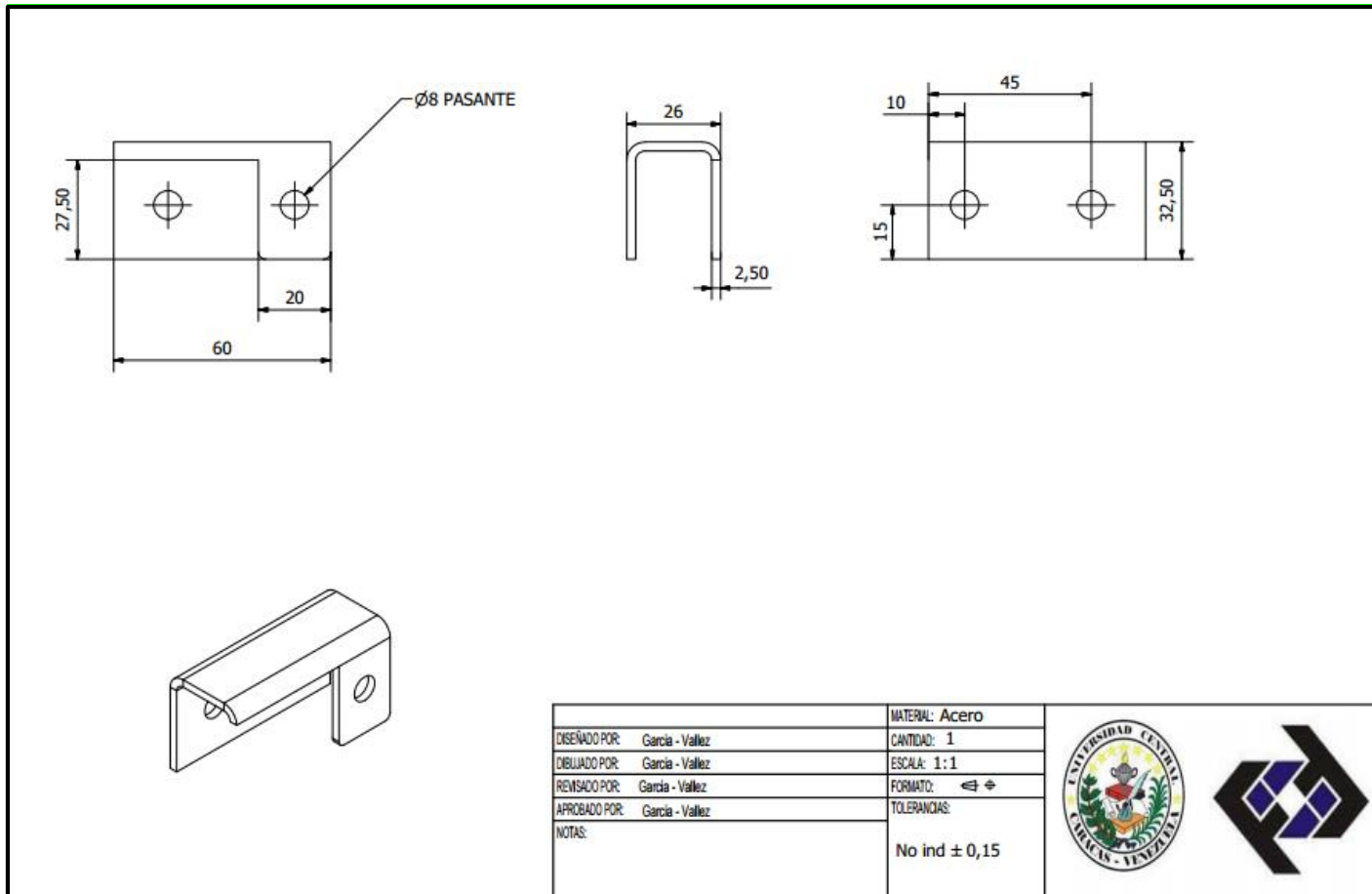
Anexo 35. Tubo sostenedor perteneciente a la base



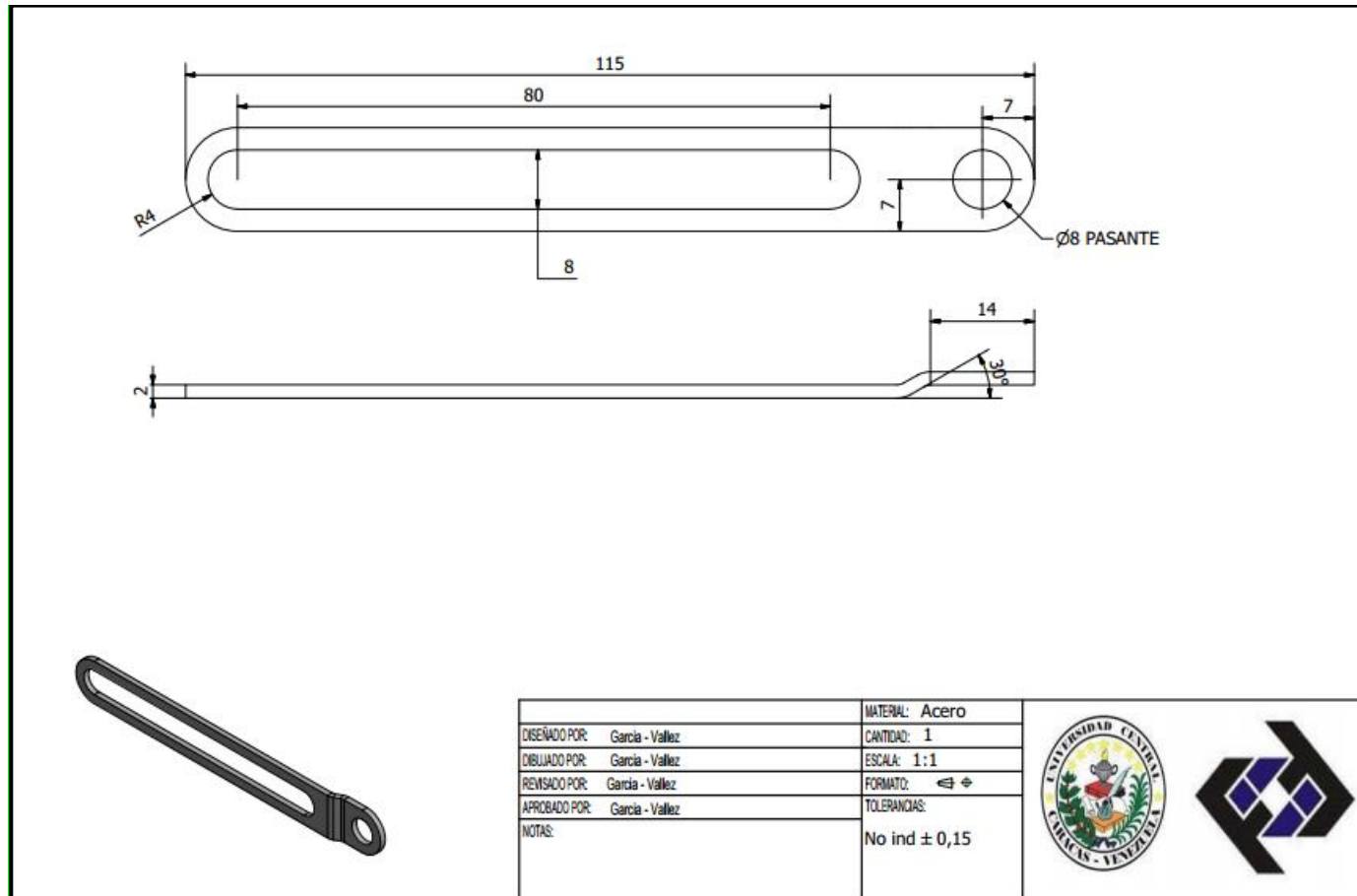
Anexo 36. Placa cuadrada de fijación del trípode



Anexo 37. Base del mecanismo de posicionamiento angular



Anexo 38. Rejilla del mecanismo de posicionamiento angular



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Caolín: “Es una roca masiva con un porcentaje variable de minerales de arcilla, de composición igual o próxima a la del mineral caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)”, estando su mineralogía, granulometría y composición química estrechamente relacionadas (Rojas, 2013).

Esfuerzo Cortante: El esfuerzo cortante puede definirse como la razón entre la fuerza promotora del movimiento y el área de contacto del fluido. El área de contacto es tangencial a la dirección de la fuerza aplicada, de allí el calificativo de corte o cizallamiento (Daily y Harleman, 1975).

Esfuerzo de cedencia: Representa el esfuerzo mínimo necesario para que un fluido comience a fluir. En ciertos casos (plásticos) algunas sustancias por debajo de este valor se comportan como sólido, pero al superarlo se comportan como un fluido (Daily y Harleman, 1975).

Fluidos newtonianos: Son denominados fluidos newtonianos todos aquellos que cumplen la Ley de viscosidad de Newton, la cual enuncia que el esfuerzo cortante de un fluido es proporcional a su tasa de deformación, cumpliendo la siguiente relación:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}$$

La constante de proporcionalidad μ representa la viscosidad absoluta o dinámica. De esta manera, en los fluidos newtonianos la viscosidad dinámica es independiente del movimiento del fluido

Fluidos no newtonianos: Son llamados fluidos no newtonianos a todos aquellos que no cumplen con la Ley de la viscosidad de Newton, es decir, aquellos cuya relación entre esfuerzo cortante y tasa de deformación no presentan un comportamiento lineal al empezar a fluir, siendo τ una función más o menos compleja de la deformación y eventualmente del tiempo. Este tipo de fluido se caracteriza porque su viscosidad varía, incluso manteniendo condiciones constantes de temperatura y composición (Sánchez, 2009).

Fluidos Reopécticos: Son aquellos fluidos cuya viscosidad aumenta con el tiempo. Así, el fluido aplica mayor resistencia a fluir a medida que transcurre un tiempo estando sometido a esfuerzos cortantes. Estos fluidos son mucho menos comunes que los tixotrópicos (Fuentes, 2008).

Fluidos Tixotrópicos: Son aquellos fluidos cuya viscosidad disminuye con el tiempo. De esta manera, mientras mayor tiempo se encuentra un fluido sometido a esfuerzo cortantes disminuye su resistencia a fluir (Fuentes, 2008).

Reograma: Es una representación gráfica que describe el comportamiento reológico de un fluido, relacionando el esfuerzo cortante en función de la tasa de deformación (Fuentes, 2008).

Reología: El término de reología fue inventado por el profesor Bingham, quien lo definió como el estudio de la deformación y el flujo de la materia. En el caso de los fluidos, la reología estudia la relación entre los esfuerzos cortantes a los cuales estos son sometidos y la rapidez de deformación como consecuencia de los mismos.

Reometría: La reometría, se refiere al campo específico de la reología que se encarga de la determinación experimental de los parámetros reológicos.

Dentro de ella, se ubican una gran cantidad de técnicas que generalmente utilizan instrumentos denominados reómetros (Sánchez, 2009).

Reómetro: Son aparatos que permiten cuantificar los diferentes parámetros reológicos de los fluidos, permitiendo obtener reogramas.

Viscosidad: Es una propiedad distintiva de los fluidos, la cual expresa la resistencia a deformarse continuamente ante esfuerzos cortantes, siendo utilizada para distinguir entre fluidos y sólidos (Sanchez, 2009).

Tasa de deformación: Se refiere al gradiente de velocidad, es decir, al cambio de velocidad en la coordenada correspondiente al espesor del fluido (Daily y Harleman, 1975).